



РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОТКИХ И УЛЬТРАКОРОТКИХ РАДИОВОЛН

МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

Основана в 1947 году

Выпуск 1034

Г. П. ГРУДИНСКАЯ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОТКИХ И УЛЬТРАКОРОТКИХ РАДИОВОЛН

*Третье издание,
переработанное и дополненное*

МОСКВА «РАДИО И СВЯЗЬ» 1981

ББК 32.841
Г90
УДК 621.371

Г. П. Грудинская

Г90 Распространение коротких и ультракоротких радиоволн. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1981. — 80 с., ил. — (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1034).

55 к.

Изложены основные сведения о распространении КВ и УКВ. Рассмотрены вопросы, связанные с дальним приемом телевидения и любительской радиосвязи. Второе издание вышло в 1960 г. Настоящее издание дополнено сведениями о распространении радиоволн в космическом пространстве и использовании спутников Земли для ретрансляции радиоволн.

Для подготовленных радиолюбителей.

Г $\frac{30404-188}{046(01)-81}$ 212-81 (Э.) 2402020000

ББК 32.841
6Ф2

РЕЦЕНЗЕНТ А. Н. ЩЕРБИЦКИЙ

ГАЛИНА ПЕТРОВНА ГРУДИНСКАЯ

Распространение коротких и ультракоротких радиоволн

Редактор издательства Т. В. Жукова
Художественный редактор Г. Н. Кованов
Технический редактор Г. И. Колосова
Корректор Н. И. Сиротинина

ИБ № 2352 (Энергия)

Сдано в набор 17.03.81 г. Подп. в печ. 5.06.81 г.
Т-20870 Формат 60×90/16 Бумага тип. № 1 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 5,0 Усл. кр.-отт. 5,375 Уч.-изд. л. 7,42
Тираж 50 000 экз. Изд. № 19435 Зак. № 43 Цена 55 к.
Издательство «Радио и связь», Москва 101000, Главпочтамт, а/я 693

Типография издательства «Радио и связь» Госкомиздата СССР
Москва 101000, ул. Кирова, д. 40

ПРЕДИСЛОВИЕ

За время, истекшее с момента последнего издания книги, вопросы распространения коротких (КВ) и ультракоротких (УКВ) волн получили дальнейшее развитие. Появились совершенно новые разделы науки и практики распространения радиоволн: распространение в космическом пространстве; использование искусственных спутников Земли для ретрансляции радиопередач; исследование поверхностей и атмосферы Земли и других планет радиотехническими методами. Углубились и развились представления о распространении радиоволн КВ диапазона.

Эти и другие достижения в области распространения радиоволн представляют большой интерес для широкого круга радиолюбителей. Поэтому в третьем, переработанном и дополненном издании книги значительное место отведено новым данным о распространении радиоволн, более подробно описаны методы экспериментального исследования ионосферы, расширен материал по сверхдальнему распространению УКВ, введена глава о распространении радиоволн в космическом пространстве.

Изучению распространения УКВ было посвящено много теоретических и экспериментальных исследований. Большой вклад в это дело внесли советские ученые Б. А. Введенский, В. А. Фок, М. А. Колосов. В настоящее время работа в этой области продолжается. Непрерывно изыскиваются новые виды применения УКВ. Освоена дальняя радиосвязь на УКВ с использованием рассеяния радиоволн на неоднородностях тропосферы и ионосферы, с использованием отражения радиоволн от следов метеоров. Осуществлена радиосвязь и передача телевидения путем ретрансляции радиоволн через ИСЗ. С помощью радиоволн советские ученые впервые в истории человечества сумели передать на Землю изображение невидимой стороны Луны. Достигнуты значительные успехи в изучении поверхности и атмосферы Венеры и Марса. Все это свидетельствует о важности вопросов распространения радиоволн и, в частности, УКВ.

В книге используется в основном установившееся в радиолюбительской литературе наименование диапазонов радиоволн — короткие, ультракороткие — и указывается их наименование по новому стандарту.

Радиолюбители были пионерами коротковолновой связи. Своими работами они способствовали расширению сведений о распространении УКВ, их опыты по дальнему приему телевидения дают ценные материалы для новых научных обобщений.

Данная книга, расширяя кругозор радиолюбителей в области распространения радиоволн, будет способствовать их дальнейшей активной работе по освоению новых диапазонов и опытам по дальнему и сверхдальнему приему телевидения.

Отзывы и пожелания просьба направлять по адресу: 101000, Москва, Чистопрудный бул., 2, издательство «Радио и связь», редакция Массовой радиобиблиотеки.

Автор

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОВОЛНАХ И АНТЕННАХ

РАДИОВОЛНЫ

Радиоволны представляют собой *электромагнитные колебания*, частота которых выше 3 кГц и может достигать 300 ГГц, примыкая к инфракрасным волнам. Электромагнитные колебания этих частот широко используются в народном хозяйстве для радиосвязи, телевидения, радиолокации, радионавигации, телеметрии, телеуправления и во многих других областях. В соответствии с особенностями построения передающей и приемной аппаратуры, областями использования и особенностями распространения радиоволны разделены на диапазоны, как это представлено в табл. 2 приложения.

По новому стандарту эти диапазоны именуются мириаметровым, километровым, гектаметровым, декаметровым (последний соответствует диапазону коротких волн КВ), метровым, дециметровым, сантиметровым, миллиметровым, ранее объединявшимися в диапазон ультракоротких волн (УКВ).

Радиоволны являются природным ресурсом, который следует разумно использовать и заботливо охранять. В 1895 г. А. С. Попов открыл возможность использования этого природного ресурса, и вот менее чем за сто лет развитие радиосредств привело к загрузке всех радиочастот и перегрузке отдельных диапазонов. Положение, сложившееся в области освоения диапазонов радиочастот, можно сравнить с историей освоения новых земель, когда сначала осваивались плодородные, легко доступные участки, а затем земли, требующие приложения бо́льших усилий, изыскания новых технических средств. К счастью для радиотехники, радиоволны — такой ресурс, который может быть использован, но не может быть израсходован. Однако возможно засорение диапазона радиочастот при нерациональном его использовании.

Радиоволны, представляя собой электромагнитные колебания, являются совокупностью электрического и магнитного полей и характеризуются напряженностью электрического и магнитного полей. Для наглядного представления электромагнитного поля на рис. 1 представлены силовые линии поля, созданного самой простой антенной — коротким вибратором. Сплошные линии изображают силовые линии электрического поля, а точки и кресты — замыкающиеся вокруг них линии магнитного поля, лежащие в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка. Вдали от антенны силовые линии электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны. Направление силовой линии поля в каждой точке характеризуется вектором напряженности поля. На рис 1 вектор напряженности электрического поля **E** направлен по оси *x*, вектор напряженности магнитного поля **H** — по оси *y*. Направление распространения волны обозначено вектором **П**, оно совпадает с осью *z* и перпендикулярно векторам **E** и **H**. При распростране-

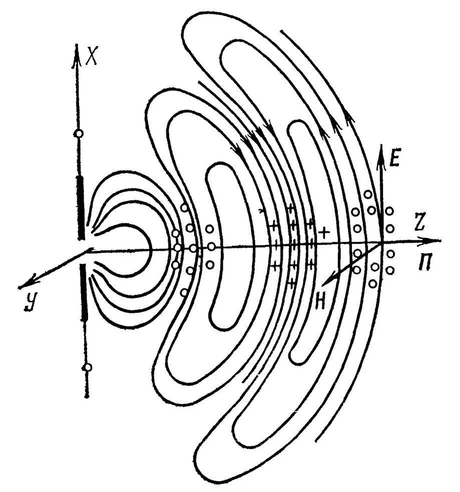


Рис. 1. Мгновенная картина поля вибратора в плоскости силовых линий электрического поля.

нии радиоволны величины векторов **E** и **H** меняются во времени с частотой радиоволны и, кроме того, меняются в направлении распространения волны.

На рис. 2 показана картина распределения напряженности электрического и магнитного полей вдоль направления распространения волны, зафиксированная для одного момента времени.

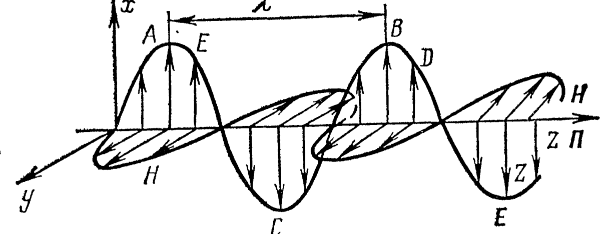


Рис. 2. Мгновенная картина распределения напряженностей электрического и магнитного полей в направлении распространения волны.

Если напряженность поля в двух точках пространства, например A и B, возрастает и убывает одновременно, то говорят, что поля в этих точках *синфазны*. Поля в точках A и C — *противофазны*, так как в любой момент времени вектора напряженности поля направлены в противоположные стороны. Поля в точках B и D колеблются с некоторой разностью фаз, зависящей от частоты колебаний и свойств среды. Расстояние между двумя ближайшими синфазными точками поля радиоволны называется *длиной волны* λ.

С изменением времени картина поля перемещается с *фазовой скоростью* распространения волны $v_ф$, которая связана с частотой колебаний и длиной волны соотношением $v_ф=f\lambda$. В свободном пространстве, пустоте, радиоволны распространяются со скоростью света $v_ф=c=300\,000$ км/с. Следовательно, в свободном пространстве длина волны в метрах определяется при известной частоте колебаний в мегагерцах следующим образом: $\lambda=300/f$. При распространении волны в какой-либо другой среде, веществе, скорость движения волны изменяется в зависимости от свойств вещества: $v_ф=c/n$, где n — коэффициент преломления среды.

При одном и том же направлении распространения волны электрическое и магнитное поля могут быть различно ориентированы в пространстве. На рис. 1 и 2 вектор поля **E** направлен вдоль оси x. Если вибратор повернуть на 90° и направить по оси y, то и вся картина поля повернется на 90°, хотя направление распространения волны не изменится. Направление вектора **E** определяет *поляризацию волны*. Рассматривая распространение радиоволн, различают *горизонтально* и *вертикально поляризованные волны*. Горизонтально поляризованной волной называют волну, у которой вектор **E** параллелен поверхности земли (рис. 3, *а*). Такая волна излучается и принимается антеннами, например, в

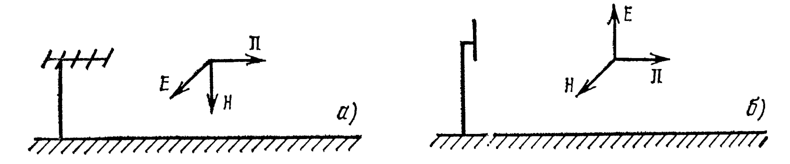


Рис. 3. Поляризация радиоволн.
а — горизонтально поляризованная волна; *б* — вертикально поляризованная волна.

виде горизонтальных вибраторов. Для передачи телевидения в большинстве городов применяются радиоволны горизонтальной поляризации. Вертикально поляризованной волной называют волну, у которой вектор **H** параллелен поверхности Земли (рис. 3, *б*). Вертикально поляризованные волны излучаются и принимаются вертикальными вибраторами и применяются, например, для радиосвязи водителей такси с диспетчерскими пунктами, службами ГАИ.

Напряженности электрического и магнитного полей связаны между собой через параметры среды, поэтому достаточно рассчитать или измерить одну из этих величин. Оказалось, что удобнее измерять напряженность электрического поля. Напряженность электрического поля измеряется в вольтах на метр (В/м), милливольтах на метр (мВ/м) или микровольтах на метр (мкВ/м): 1 мкВ= $=10^{-3}$ мВ/м$=10^{-6}$ В/м. Часто пользуются относительными логарифмическими единицами — децибелами (дБ) 1 дБ$=20\lg E/E_1$. Обычно принимают $E_1=$ $=1$ мкВ/м и 1 мВ/м. Поэтому напряженность поля, например 1000 мкВ/м, равна 60 дБ, отнесенным к 1 мкВ (в 1000 раз или на 60 дБ больше 1 мкВ). В приложении дана табл. 1, позволяющая определить, во сколько раз напряженность поля отличается от некоторого значения, если известно, сколько децибел составляет эта разница.

РАДИОВОЛНЫ В СРЕДЕ

Распространение радиоволн происходит в некоторой среде вблизи поверхности Земли, в ее атмосфере, в космическом пространстве, причем на условия распространения радиоволн оказывают влияние электрические свойства среды, определяемые ее *проводимостью и диэлектрической проницаемостью*. Проводимость веществ определяется наличием свободных электронов в веществе. Чем больше свободных (способных перемещаться) электронов в кубическом сантиметре вещества, тем ближе его электрические свойства к свойству проводника. Диэлектрические свойства вещества определяются способностью молекул вещества поворачиваться под действием электрического поля. Чем больше проводимость вещества, тем больше энергии теряет электромагнитная волна при распространении в этом веществе, большая часть электромагнитной энергии переходит в тепловую. (Не следует смешивать это обстоятельство с явлением уменьшения потерь в проводе при увеличении его проводимости.)

Наличие у веществ свойств проводника и диэлектрика приводит к тому, что в веществах одновременно существуют *токи проводимости*, совпадающие по фазе с напряжением, и *токи смещения*, отличающиеся по фазе от напряжения на 90°. Если токи проводимости значительно больше токов смещения, то вещество можно считать *проводником*, при обратном соотношении — *диэлектриком*. Значение тока смещения зависит от частоты колебаний, поэтому и соотношение между токами проводимости и смещения меняется в зависимости от частоты колебаний. Таким образом, одно и то же вещество может проявлять на разных частотах то свойства проводника, то свойства диэлектрика. Это относится, конечно, и к электрическим свойствам поверхности Земли (суши и моря) и атмосфере.

Для характеристики поглощающих свойств среды пользуются понятием *удельного коэффициента поглощения* $\Gamma_{уд}$ (децибелы на километр), показывающего, во сколько раз уменьшилась напряженность поля при прохождении единицы пути (1 м или 1 км), и *коэффициентом поглощения* на всем пути r (в километрах). Коэффициент поглощения удобно выражать в децибелах Γ (дБ)$=$ $=\Gamma_{уд}\, r=20\lg E/E_0$, где E — напряженность поля волны, прошедшей расстояние r (в километрах) в поглощающей среде; E_0 — напряженность поля волны, прошедшей то же расстояние в свободном пространстве.

В однородной среде, т. е. в среде, свойства которой не меняются по всему объему, волна движется прямолинейно с постоянной скоростью. При переходе волны из одной среды в другую на границе раздела двух сред происходит преломление и отражение волны. Волна частично проходит во вторую среду, причем направление ее движения меняется, и частично отражается от границы раздела сред (рис. 4). В этом случае угол падения волны равен углу отражения, а угол падения φ и угол преломления ψ связаны соотношением

$$\sin\varphi/\sin\psi = n_2/n_1, \qquad (1)$$

где n_1 и n_2 — коэффициенты преломления первой и второй сред соответственно.

Если поверхность, на которую падает волна, представляет собой идеальный проводник, то волна полностью отражается от границы раздела и не проходит во вторую среду. Такое отражение называется зеркальным.

В случае, когда свойства среды (коэффициент ее преломления) неодинаковы в различных местах, т. е. когда среда неоднородна, волна преломляется и движется по криволинейной траектории. Чем более неоднородна среда, чем резче меняется коэффициент преломления, тем больше кривизна траектории (рис. 5).

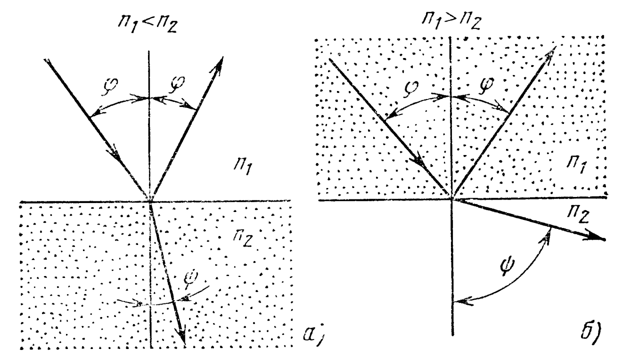


Рис. 4. Преломление радиоволн.
а — при переходе из менее плотной среды в более плотную; *б* — при переходе из более плотной среды в менее плотную.

Явление искривления траектории движения волны в неоднородной среде называется *рефракцией*. В том случае, когда волна переходит из среды с бóльшим коэффициентом преломления в среду с меньшим коэффициентом преломления (например, из воды в воздух), при достаточно большом угле падения может наступить явление *полного внутреннего отражения*, т. е. вся энер-

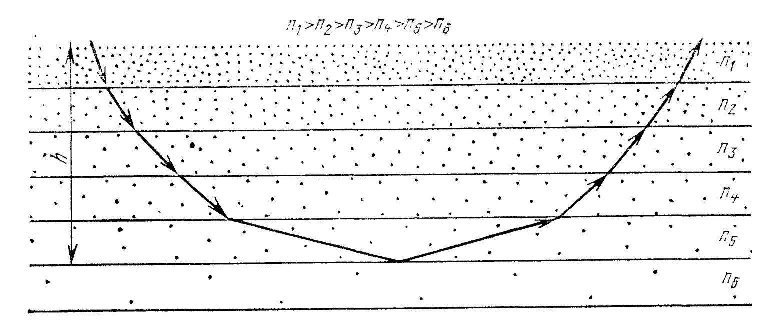


Рис. 5. Рефракция радиоволн.

гия волны отразится от границы раздела и не проникает во вторую среду. Явление полного внутреннего отражения может иметь место и в неоднородной среде, когда коэффициент преломления среды уменьшается в направлении движения волны. При этом волна не проникает дальше некоторого определенного расстояния (расстояние *h* на рис. 5).

Нередко в место приема приходит не одна, а две или несколько волн одной и той же частоты. Например, если передающая антенна расположена в точке *А* (рис. 6, *а*), а на некотором расстоянии от нее имеется отражающая поверхность *В*, то в точку *Б* волны могут прийти двумя путями: прямым путем по линии *АБ* и по пути *АВБ*. В точке *Б* происходит сложение полей этих двух волн — интерференция, причем результирующее поле может оказаться либо больше, либо меньше полей отдельных волн. Если разность длин путей *АВБ* и *АБ* составляет целое число длин волн, то поля складываются в фазе и результирующее полс оказывается больше полей отдельных волн (рис. 6, *б*). Если же разность длин волн составляет целое число полуволн, то поля вычитаются (складываются в противофазе) и результирующая напряженность поля оказывается меньше складывающихся полей (рис. 6, *в*).

Представим себе, что положение отражающей поверхности меняется таким образом, что разность длин путей *АВБ* и *АБ* составляет то целое число длин волн, то целое число полуволн. Тогда амплитуда результирующего поля будет меняться от максимального значения до минимального, т. е. напряженность поля будет то увеличиваться, то уменьшаться. Такие колебания напряженности поля называют *замираниями*.

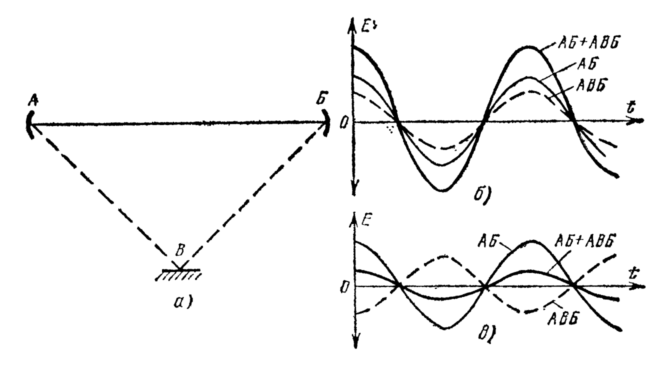


Рис. 6. Интерференция двух волн.

Если на пути распространения волны встречается непрозрачное препятствие, то волна стремится его обогнуть (рис. 7). Явление огибания волной встречающихся на ее пути препятствий называется *дифракцией*. Дифракция наиболее сильно проявляется в том случае, когда размеры препятствия сравнимы с длиной волны. Если препятствие очень мало по сравнению с длиной волны, то напряженность поля за препятствием меняется незначительно (рис. 7, *а*). При относительно больших размерах препятствия волна практически его не огибает и за препятствием образуется область тени, где напряженность поля мала (рис. 7, *б*).

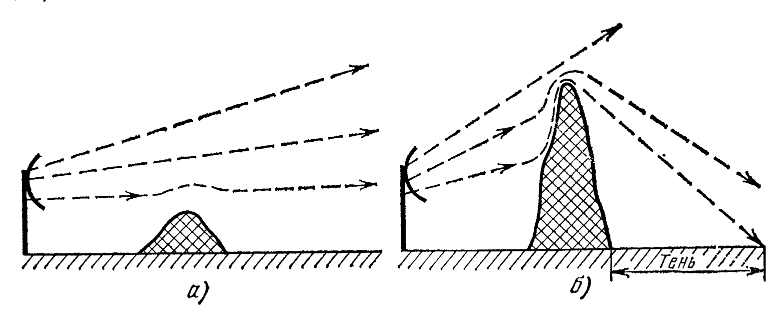


Рис. 7. Дифракция радиоволн.
а — препятствие мало по сравнению с длиной волны; *б* — препятствие велико по сравнению с длиной волны.

АНТЕННЫ

Антенны служат для излучения мощности радиоволн, поступающей от передатчика, или приема радиоволн, извлечения из электромагнитного поля мощности. Известно много типов антенн, отличающихся принципом действия, конструкцией, внешним видом, но работа любой антенны характеризуется ее параметрами, такими как диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, поляризационные свойства.

Диаграммой направленности называют графическую зависимость, показывающую, как распределяется в пространстве мощность, излученная антенной, или с каких направлений антенна может принимать радиоволны.

Антенна, одинаково излучающая во все стороны, называется *ненаправленной*. На рис. 8, *а* изображена диаграмма направленности такой антенны, представляющая собой окружность. В большинстве случаев желательно сосредоточить излучаемую антенной мощность в определенном направлении, т. е. сузить диаграмму направленности, придав ей вид, изображенный на рис. 8, *б*. Угол θ,

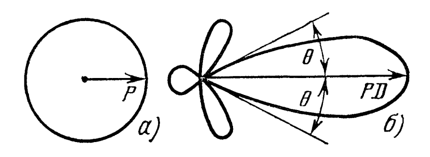


Рис. 8. Диаграммы направленности антенн.
а — ненаправленная антенна; *б* — направленная антенна.

в пределах которого заключена основная часть излучаемой мощности, характеризует ширину диаграммы направленности. Степень концентрации мощности, излученной антенной в желаемом направлении, определяется *коэффициентом направленного действия антенны*. Он обозначается буквой D. Направленная антенна, излучающая мощность P, создает такую же напряженность поля в месте приема, как ненаправленная антенна, излучающая мощность PD.

Если размеры антенны больше или немного меньше длины волны, то такая антенна может обладать направленностью. Выполнить направленные антенны для волн длиной в тысячи метров почти невозможно. В диапазоне сантиметровых волн удается сконцентрировать излученную мощность в угле менее 1°. Линейные размеры такой антенны достигают нескольких десятков метров.

Не вся мощность, подводимая от передатчика к антенне, излучается. Отношение мощности, излученной антенной, к мощности, подведенной к ней, называется *коэффициентом полезного действия* (к. п. д.) антенны. Произведение к. п. д. антенны на ее коэффициент направленного действия называется *коэффициентом усиления антенны* G. Коэффициент усиления антенны УКВ может достигать больших значений. Для антенн типа «волновой канал» в диапазоне метровых волн коэффициент усиления составляет $G=5\div20$, а для параболической антенны в диапазоне сантиметровых волн он достигает $G=10^4\div10^5$.

Антенны излучают волны определенной поляризации, как это было показано на примере вибратора. Антенна принимает волны той же поляризации, что и излучает. Для эффективного приема характер поляризации поля принимаемой волны и поляризационные свойства приемной антенны должны совпадать.

При распространении радиоволн в свободном пространстве без учета влияния поверхности и атмосферы Земли действующее значение напряженности поля в милливольтах на метр, создаваемого антенной, можно подсчитать по формуле

$$E = 173\sqrt{PG}/r, \qquad (2)$$

где P — мощность, подводимая к антенне, кВт; G — коэффициент усиления антенны; r — расстояние от передающей антенны до точки приема, км.

Из этой формулы следует, что напряженность поля обратно пропорциональна расстоянию от передающей антенны до точки приема и пропорциональна квадратному корню из значения излучаемой мощности.

Можно рассчитывать не напряженность поля вблизи приемной антенны, а непосредственно мощность, выделяемую на входе приемника, согласованного с приемной антенной, $P_{пр}$:

$$P_{пр} = PG_{пер}\,G_{пр}\,\lambda^2/(4\pi r)^2, \qquad (3)$$

где $G_{пер}$ и $G_{пр}$ — соответственно коэффициенты усиления передающей и приемной антенны. Мощность, получаемая в приемной антенне, обратно пропорциональна квадрату расстояния от передающей до приемной антенны. Убывание мощности принятого сигнала с расстоянием по сравнению с мощностью излученного сигнала удобно оценивать в децибелах: $\Gamma = 10\lg P_{пр}/P$.

Если не учитывать потери мощности в среде, то уменьшение мощности сигнала с расстоянием, называемое потерями в свободном пространстве, определяются формулой

$$\Gamma_0 = -[33 + 20(\lg r + \lg f)] + G_{пер} + G_{пр}, \qquad (4)$$

где Γ_0 — потери, дБ; r — расстояние, км; f — рабочая частота, МГц; $G_{пер}$ и $G_{пр}$ — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, дБ.

В табл. 1 приложения указано, во сколько раз изменилась мощность, если известна разница в децибелах.

При распространении в среде полные потери (в децибелах) складываются из потерь в свободном пространстве и потерь на поглощение в среде

$$\Gamma_{полн} = \Gamma_0 + \Gamma. \qquad (5)$$

В диапазонах КВ и УКВ антенны стремятся поднять на некоторую высоту над поверхностью земли, чтобы постройки, деревья, холмы не препятствовали распространению радиоволн.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ И АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

ПОВЕРХНОСТЬ ЗЕМЛИ

Работа большинства радиолиний, особенно УКВ диапазона, зависит от характера и электрических свойств поверхности Земли, над которой проходит радиолиния. По своим электрическим свойствам поверхность Земли представляет существенно неоднородную среду. Электрические свойства сухой и влажной почвы различны — чем больше влажность, тем больше проводимость и диэлектрическая проницаемость. Соленая вода морей обладает большей проводимостью, чем пресная вода озер и рек, а диэлектрические проницаемости у них практически одинаковы. Радиоволны, распространяясь вблизи поверхности Земли, частично проникают в глубь поверхности и поглощаются в ней, а частично отражаются. Чем короче длина волны, тем на меньшую глубину проникает волна в глубь поверхности суши или моря. Например, поле волны длиной 3 м уменьшается на 120 дБ на глубине примерно 40 см под поверхностью моря, а волна длиной 3 см испытывает такое же поглощение уже на глубине 4 см. Поле отраженной волны тем больше, чем влажнее почва, и при отражении от воды больше, чем при отражении от почвы.

В диапазоне КВ и особенно УКВ поле отраженной волны зависит от неровностей поверхности Земли. При падении радиоволн на неровную поверхность имеет место рассеянное отражение, причем напряженность поля отраженной волны оказывается меньше, чем при отражении от гладкой поверхности.

Поверхность Земли не идеально ровная, но рассеянное отражение наблюдается только в том случае, когда высота неровностей h больше некоторого значения, зависящего от длины волны и угла падения волны на поверхность (рис. 9), т. е. когда

$$h > \lambda/8\cos\varphi. \qquad (6)$$

Полого падающие волны рассеиваются более высокими неровностями, чем волны, падающие отвесно. Понятие «неровная поверхность» различно для волн разных диапазонов: для КВ неровностями являются дома, холмы, большие деревья, для сантиметровых радиоволн даже небольшие бугры и трава представляют значительную неровность.

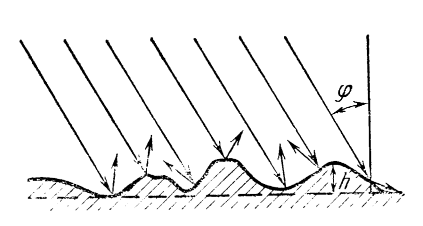


Рис. 9. Рассеяние радиоволн неровностями Земли.

АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ

Атмосфера Земли простирается от поверхности Земли до расстояния, равного примерно трем радиусам земного шара (радиус земного шара составляет в среднем 6370 км). Состав газов атмосферы меняется с высотой: вблизи поверхности Земли основными газами являются молекулярный азот и кислород (78 и 21% по объему соответственно), а начиная с высоты 100 км появляются атомарные составляющие этих газов. На больших высотах содержатся легкие газы — гелий и водород. Начиная с высоты 80 км в атмосфере содержится значительное количество свободных электронов, а начиная с высоты 300—400 км весь газ состоит из электронов и ионов. Таким образом, состав, строение и свойства атмосферы меняются с высотой. В атмосфере различают две большие области: *нейтросферу* от поверхности Земли до высоты 60 км, где газы нейтральные, свободных электронов мало, и *ионосферу*, выше 60 км, где газы частично или полностью ионизированы. Электрические свойства этих областей

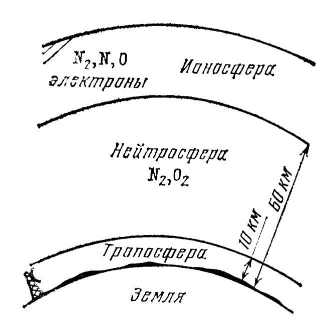


Рис. 10. Строение атмосферы Земли.

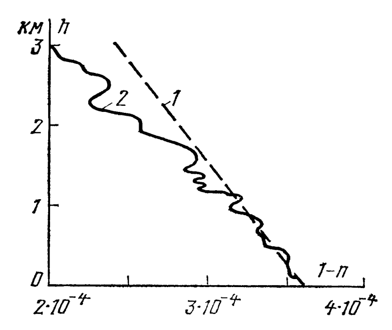


Рис. 11. Изменение коэффициента преломления воздуха в зависимости от высоты.

1 — идеализированный график для нормальной тропосферы; *2* — реальный график, полученный в результате измерений.

различны, и они не одинаково влияют на распространение радиоволн. В пределах нейтросферы выделяют область, примыкающую непосредственно к поверхности Земли, где плотность газа наибольшая. Эта область названа *тропосферой* (что значит изменчивой средой). Схематически строение атмосферы представлено на рис. 10. Тропосфера и ионосфера оказывают основное влияние на распространение радиоволн.

ТРОПОСФЕРА

Тропосфера простирается от поверхности Земли до высоты 10—15 км. Состояние тропосферы характеризуется давлением воздуха, температурой, влажностью. С увеличением высоты над поверхностью Земли плотность воздуха уменьшается. Обычно уменьшаются влажность и температура воздуха. Это объясняется тем, что в пределах тропосферы воздух нагревается за счет излучения тепла поверхностью Земли. Поэтому параметры тропосферы меняются в зависимости от времени года, суток, метеорологических условий.

Коэффициент преломления воздуха принято считать равным 1. Но это справедливо только в первом приближении. В действительности коэффициент преломления тропосферы зависит от давления, температуры и влажности воздуха и незначительно отличается от 1. При нормальных давлении, влажности и температуре коэффициент преломления составляет примерно 1,00034. Зависимость коэффициента преломления от давления p, температуры T и давления водяных

паров $p_п$ определяется следующей формулой, коэффициенты в которой подобраны опытным путем:

$$n = 1 + \frac{78,5}{T}\left(p + \frac{4800\,p_п}{T}\right)\cdot 10^{-8}\,, \qquad (7)$$

где n — коэффициент преломления воздуха (величина безразмерная); T — абсолютная температура, К ($T = 273 + t$ °С); p и $p_п$ — давления, Па.

Коэффициент преломления с увеличением высоты над поверхностью Земли уменьшается, стремясь к 1. Поэтому нижние слои тропосферы являются неоднородной средой, причем параметры ее меняются в зависимости от времени суток, года и погоды. Неоднородности изменения коэффициента преломления тропосферы существенны до высоты примерно 10 км. Уже на этой высоте значение $n - 1 = 109\cdot 10^{-6}$ и постоянно на всем земном шаре.

Как видно из приведенных цифр, абсолютное значение коэффициента преломления тропосферы изменяется мало. Но на распространение радиоволн оказывает влияние не абсолютное значение коэффициента преломления, а закон его изменения с высотой. Многочисленные наблюдения показали, что в средних широтах среднее состояние тропосферы характеризуется равномерным изменением ее коэффициента преломления с высотой. Тропосфера, в которой коэффициент преломления уменьшается на $4\cdot 10^{-8}$ на каждый метр изменения высоты, называется нормальной тропосферой.

Закон изменения коэффициента преломления тропосферы в зависимости от высоты часто сильно отличается от линейного. Бывают случаи, когда коэффициент преломления сначала убывает при увеличении высоты, затем с некоторого уровня начинает возрастать и затем снова убывает. Иногда вблизи поверхности Земли коэффициент преломления возрастает при увеличении высоты, а затем начинает уменьшаться. На рис. 11 приведен график изменения коэффициента преломления воздуха в зависимости от высоты.

Как отмечалось, неоднородность атмосферы в вертикальном направлении приводит к искривлению траектории волны, т. е. к рефракции. С изменением коэффициента преломления меняется и траектория распространения волны. Следовательно, всякое изменение метеорологических условий влияет на распространение радиоволн, особенно УКВ. Поэтому для изучения условий распространения УКВ весьма важно иметь достаточно полные метеорологические данные.

Тропосфера неоднородна и в горизонтальном направлении. В ней имеются местные неоднородности. Так, например, в некоторых местах воздух имеет сравнительно высокую температуру или влажность. Поэтому в отдельных точках тропосферы коэффициент преломления может заметно отличаться от среднего значения. Таким образом, в тропосфере имеются объемные неоднородности. Причиной их появления является турбулентное движение воздуха в атмосфере, т. е. движение с завихрениями. Отдельные участки поверхности земли нагреваются различно. От этого в тропосфере появляются восходящие и нисходящие воздушные потоки, и в разных участках плотность воздуха оказывается различной. Объемные неоднородности тропосферы также оказывают большое влияние на распространение УКВ, вызывая рассеяние радиоволн.

Проводимость воздуха очень мала, поэтому при распространении в тропосфере радиоволны длиннее 30 см практически не испытывают поглощения. Более короткие волны поглощаются в капельках воды. Поле радиоволн высокой частоты наводит в капельках воды токи смещения, а за счет проводимости воды происходит поглощение энергии радиоволн при прохождении через зону дождя и тумана.

ИОНОСФЕРА

Ионосфера стала доступной для непосредственного изучения только в последнее десятилетие, когда начали осуществляться запуски геофизических ракет, спутников, космических кораблей. До этого исследования ионосферы проводились косвенными методами.

Само название ионосферы указывает на то, что некоторая часть атомов и молекул находящихся в ней газов ионизирована. Ионы и электроны образуются в результате ионизации, которая заключается в отрыве электрона от нейтраль-

ной молекулы. Для того чтобы оторвать электрон, необходимо затратить некоторую энергию. Основным источником энергии, идущей на ионизацию газа в атмосфере, является Солнце, излучающее ультрафиолетовые лучи и мельчайшие быстролетящие частицы. Пока атмосфера освещена Солнцем, в ней непрерывно образуются все новые и новые электроны, но одновременно часть старых электронов сталкивается с ионами и опять образует нейтральные частицы — атомы и молекулы. С заходом Солнца образование новых электронов почти прекращается и количество свободных электронов убывает. Количество электронов, находящихся в 1 см³ газа, называется *электронной плотностью.*

Наличие свободных электронов сообщает газу особые электрические свойства. Представим себе конденсатор, площадь пластин которого равна 1 м², а расстояние между ними составляет 1 м (рис. 12). Если такой конденсатор поместить в вакуум, то емкость его будет равна электрической постоянной ε_0. Введем в объем, заключенный между пластинами конденсатора, некоторое количество электронов N. Каждый из них имеет массу m и заряд e. К пластинам конденсатора приложено переменное напряжение амплитуды U_m, изменяющееся с частотой f: $U=U_m\cos 2\pi ft$. Под влиянием электрического поля электроны придут в колебательное движение с частотой поля. При этом амплитуда скорости заряженной частицы u пропорциональна ее заряду e и напряжению электрического поля U и обратно пропорциональна массе m и частоте поля f:

Рис. 12. К выводу выражения для диэлектрической проницаемости ионизированного газа.

$$u=\frac{Ue}{2\pi fm}.$$

Движущиеся заряды есть не что иное, как ток, причем амплитуда тока I_m определяется общим зарядом Ne, умноженным на скорость u: $I_m=Neu=$ $=Ne^2U_m/2\pi fm=U_m\bigg/\left(\frac{2\pi fm}{Ne^2}\right)$. Это уравнение аналогично известному выражению для тока, протекающего через индуктивность: $I_m=U_m/(2\pi fL)$.

Следовательно, колеблющиеся электроны будут оказывать такое же влияние, как и эквивалентная индуктивность $m/(Ne^2)$, шунтирующая конденсатор

Эквивалентная емкость такого конденсатора $C'=\varepsilon_0-Ne^2/(2\pi f^2m)$ соответствует конденсатору, заполненному диэлектриком с абсолютной диэлектрической проницаемостью, отличной от ε_0:

$$\varepsilon_a=\varepsilon_0\left(1-\frac{Ne^2}{\varepsilon_0\,2\pi f^2m}\right). \qquad (8)$$

Таким образом, наличие свободных электронов в газе приводит к изменению диэлектрической проницаемости, а следовательно, и преломляющих свойств газа. При этом диэлектрическая проницаемость ионизированного газа всегда меньше, чем диэлектрическая проницаемость воздуха, и зависит от электронной плотности. Диэлектрическая проницаемость зависит также от частоты электромагнитных колебаний. Поэтому ионосфера оказывает неодинаковое влияние на распространение радиоволн различных диапазонов. Для волн короче 10 м ионосфера почти прозрачна, тогда как более длинные волны отражаются от нее.

Во время движения электроны могут сталкиваться с молекулами и атомами газа. Электрон, столкнувшись с молекулой, отдает ей накопленную энергию. Молекула получает добавочную скорость. Но движение молекул не создает тока, а является тепловым движением. Таким образом, при прохождении волны в иионизированном газе часть ее энергии затрачивается на повышение температуры газа. Энергия коротких и ультракоротких радиоволн при прохождении ионосферы уменьшается и тем больше, чем длиннее волна.

Электронная плотность по высоте ионосферы меняется, причем имеется несколько более или менее выраженных максимумов ионизации. Следовательно, на различных высотах в ионосфере получаются как бы слои с неодинаковой электронной плотностью. Самый нижний ионизированный слой принято обозначать буквой D, а более высокие — буквами E, F_1 и F_2. Эти слои по-разному влияют на распространение радиоволн различной длины.

До последнего времени сведения об ионосфере получали главным образом путем радиозондирования, осуществляемого с помощью ионосферных станций (рис. 13). Передатчик ионосферной станции посылает импульсы вертикально вверх. Частота заполнения импульсов меняется. Отраженные импульсы принимают и наблюдают на осциллографе. По времени запаздывания импульса определяют, на какой высоте произошло отражение волны данной частоты, и строят *высотно-частотные характеристики* (рис. 14). Этот метод не позволяет исследовать пространство, находящееся выше верхнего ионосферного слоя.

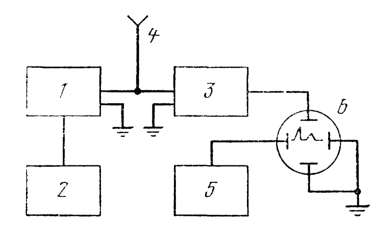


Рис. 13. Схема ионосферной станции.

1 — генератор; *2* — импульсный модулятор; *3* — приемник; *4* — антенна; *5* — генератор развертки; *6* — осциллограф.

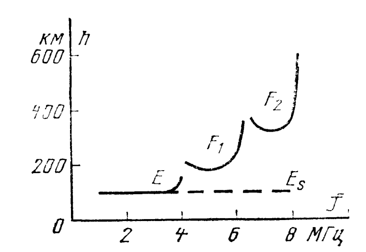


Рис. 14. Высотно-частотные характеристики ионосферы.

Оставалось загадкой, что происходит выше верхнего максимума ионизации, т. е. выше примерно 300 км. Полное представление о строении ионосферы было получено только после запуска геофизических ракет и спутников. Исследование атмосферы при помощи ракет было начато еще в 30-х годах. Регулярные запуски ракет на высоты до 200 км и более стали осуществляться только в пятидесятые годы. Особенно большое значение для исследования ионосферы имел запуск ракеты, осуществленный 27 февраля 1958 г. Эта ракета поднялась на высоту 470 км, что позволило получить сведения о плотности ионизации на этих высотах. Последующие многочисленные запуски ракет, спутников, космических кораблей со специальной аппаратурой дополнили и уточнили эти сведения.

Измерение электронной плотности при помощи ракет и спутников проводят, наблюдая за прохождением радиоволн через ионосферные слои. Для этого используются УКВ. На ракете устанавливается передатчик, генерирующий основную частоту и гармонику. На советских высотных ракетах и спутниках устанавливают передатчики, генерирующие основную частоту 48 МГц и гармонику частотой 144 МГц. На прохождение волны частотой 144 МГц ионосфера не влияет: для нее вся ионосфера практически прозрачна, и волна распространяется со скоростью света в свободном пространстве. Скорость же распространения волны частотой 48 МГц зависит от электронной плотности ионосферы. В приемнике частоту сигнала 48 МГц умножают на 3 и смешивают с принятым сигналом на частоте 144 МГц. Сигналы распространяются с различными скоростями и приходят в разной фазе, причем разность фаз зависит от плотности ионизации. Измеряя разность фаз и наблюдая за высотой ракеты, определяют распределение электронной плотности с высотой.

Полученная путем таких измерений зависимость электронной плотности от высоты показана на рис. 15. На этом рисунке высота и электронная плотность отложены в логарифмическом масштабе. На графике видны три максимума ионизации. Самый верхний, резко выраженный максимум ионизации относится к

слою *F*. Это основной слой, отражающий короткие волны и обусловливающий возможность связи на КВ на расстояниях в десятки тысяч километров. Второй, меньший максимум, расположенный на высоте 120 км, относится к слою *E*. От этого слоя отражаются средние волны в ночные часы. Самый нижний максимум ионизации находится на высоте 80 км и относится к слою *D*. От этого слоя отражаются длинные волны.

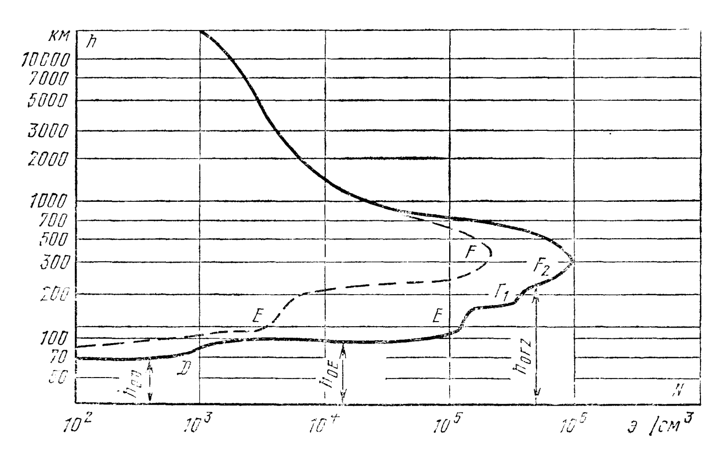


Рис. 15. Изменение электронной плотности ионосферы с высотой

(——— — днем, — — — — — ночью).

Электронная плотность слоев меняется в зависимости от времени суток и года. Наибольшая плотность наблюдается в полдень для всех слоев (кроме слоя *F*) летом. Слой *F* имеет наибольшую плотность в полдень зимой. На рис. 16 показано, как меняется плотность слоев в течение суток.

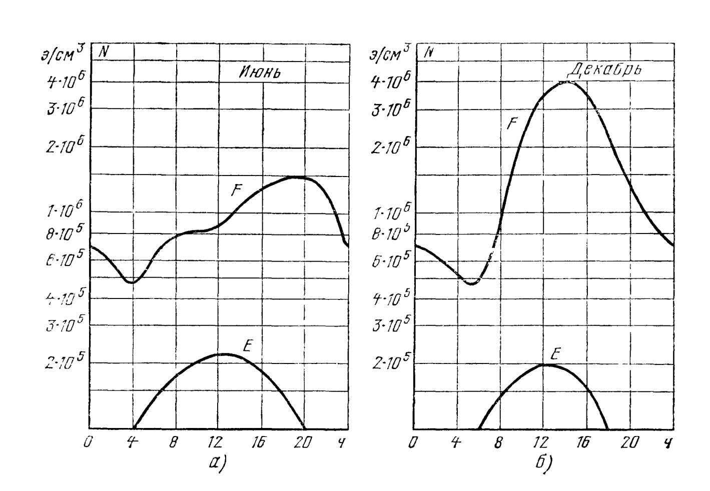


Рис. 16. Изменение электронной плотности ионосферных слоев в течение суток.

а — летние месяцы; *б* — зимние месяцы.

Электронная плотность слоев, особенно слоя F, меняется от года к году в соответствии с циклами солнечной деятельности. Многолетние наблюдения показали, что деятельность Солнца периодически меняется, причем этот период составляет примерно 11 лет (рис. 17). Астрономы наблюдали появление на поверхности Солнца темных образований, названных солнечными пятнами, которые долгое время служили критерием деятельности Солнца. Было установлено, что чем больше площадь, занимаемая солнечными пятнами, тем интенсивнее ультрафиолетовое излучение Солнца, а следовательно, и его ионизирующая способность Таким образом, в годы, когда число солнечных пятен велико, в годы максимума солнечной деятельности, плотность ионизации ионосферных слоев значительно увеличивается.

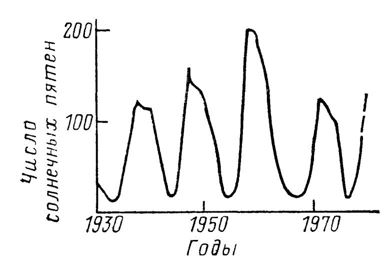
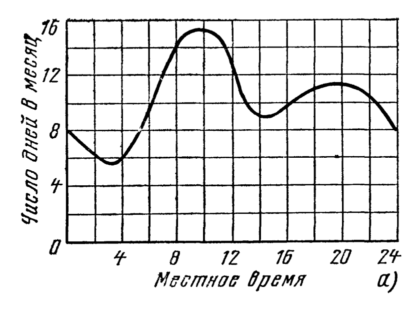


Рис. 17. Циклическое изменение деятельности Солнца (число солнечных пятен).

В ионосфере временами на высоте 90—110 км появляется так называемый нерегулярный, *спорадический слой* E_c. Спорадический слой представляет собой скопление ионизированного газа гораздо большей электронной плотности, чем электронная плотность на той же высоте в окружающей среде. Этот слой появляется над сравнительно небольшой территорией (примерно 100×100 км) и может перемещаться под действием господствующих в ионосфере ветров в каком-либо направлении. Скорость перемещения этого слоя примерно 150—250 км/ч. Спорадический слой присутствует не всегда. Чаще всего он появляется в дневные часы летом в южных широтах. Так, в экваториальной зоне в дневное время он бывает почти все время. В средних широтах в дневное время летом он присутствует в течение 50—70% времени, т. е. 15—20 дней в месяц. Иногда спорадический слой существует всего несколько часов, а иногда и несколько минут. Зимой в средних широтах слой E_c появляется редко. Изменение количества случаев появления слоя E_c в зависимости от времени суток (в летние месяцы) и времени года (в дневные часы) показано на рис. 18. Частота появления и электронная плотность спорадического слоя не зависят от 11-летнего цикла солнечной деятельности. Причины образования этого слоя еще не установлены, поэтому не удается предсказать время и продолжительность его появления. Спорадический слой играет существенную роль в сверхдальнем распространении УКВ.

Ранее отмечалось, что ионизированный слой представляет собой неоднородную среду с убывающим по высоте коэффициентом преломления. В таком слое возможно явление полного внутреннего отражения. При этом для отражения



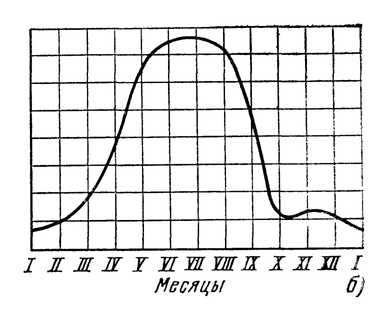


Рис. 18. Число дней в месяце, когда присутствует слой E_c (в средних широтах).
а — зависимость от времени суток (лето); *б* — зависимость от времени года (дневные часы).

более длинных волн нужна меньшая электронная плотность газа. Для слоя определенной электронной плотности существует некоторая максимальная частота колебаний, при которой слой способен отражать радиоволны. Радиоволны, частота колебаний которых превышает максимальную частоту, не отражаются слоем, а проходят, преломляясь, сквозь ионосферу. Кроме того, для данной частоты радиоволны существует некоторое критическое значение угла возвышения волны, при котором при данной электронной плотности слоя радиоволны еще могут отразиться от слоя.

Максимальная частота приближенно связана простым соотношением с электронной плотностью ионосферы и углом возвышения траектории излученной волны

$$f_{\max} = 9 \cdot 10^{-3} \sqrt{N}/\sin\varphi, \quad (9)$$

где $f_{\max}$ — максимальная частота, МГц; N — электронная плотность на высоте отражения, определенная как число электронов, содержащихся в 1 см^3; φ — угол возвышения траектории волны, показанный на рис. 19.

Угол возвышения определяется расстоянием, на которое надо вести передачу. Чем больше расстояние, тем выше частота волны, которая может отразиться от ионосферы. При данной электронной плотности наименьшее значение имеет максимальная частота отражения, если волна послана вертикально вверх ($\varphi = 90°$). Эта частота называется критической частотой слоя и является важным параметром ионосферного слоя

$$f_{\text{кр}} = 9 \cdot 10^{-3} \sqrt{N}\,[\text{МГц}]. \quad (10)$$

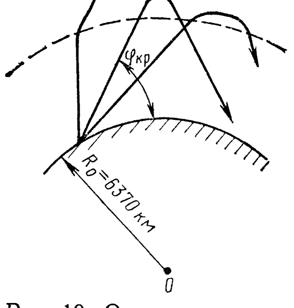


Рис. 19. Отражение радиоволн от ионосферы.

Например, если, как показано на рис. 15, электронная плотность слоя E днем равна 10^5 э/см^3, то его критическая частота $f_{\text{кр}\,E} = 3$ МГц. Критическая частота основного максимума ионизации слоя F может достигать значений $f_{\text{кр}\,F} = 10 \div 15$ МГц. Волны с более высокой частотой колебаний, если они посланы вертикально вверх, не отразятся от ионосферы, а уйдут за ее пределы в космическое пространство.

Ионосферные слои неоднородны по своей структуре. Они представляют собой как бы скопление облаков ионизированного газа. Местами электронная плотность газа больше, местами — меньше. Размеры этих облаков достигают 50—150 м. Поэтому и обнаружить их можно только на коротких и метровых волнах. Облака ионизированного газа непрерывно образуются, рассасываются и находятся в хаотическом движении. Наиболее отчетливо наличие таких неоднородностей выражено на высотах 70—80 км.

Радиоволны рассеиваются на неоднородностях ионосферных слоев. При этом рассеянное отражение направлено во все стороны и главным образом в направлении первоначального движения волны. Использование явления рассеяния на неоднородностях ионосферных слоев открыло новые широкие возможности применения УКВ.

Кратковременная ионизация атмосферы происходит при вторжении в нее метеоров. В атмосферу попадает сравнительно мало крупных метеоров, которые могут наблюдаться визуально: всего 2—3 метеора в час на всем земном шаре. Но мелкие пылеобразные частицы массой в доли грамма попадают в атмосферу в большом количестве.

ПОМЕХИ РАДИОПРИЕМУ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ И АТМОСФЕРНЫЕ ПОМЕХИ

Качество радиоприема определяется не абсолютным значением напряженности поля полезного сигнала, а отношением напряженности поля полезного сигнала к напряженности поля постороннего, мешающего сигнала — помехи, имеюще-

го ту же частоту колебаний. Для каждого вида радиолинии напряженность поля сигнала должна превосходить напряженность поля помехи в определенное число раз или на заданное число децибел. Также можно говорить, что мощность полезного сигнала на выходе приемной антенны должна превосходить мощность помехи на то же число децибел. Зная напряженность поля помех в данном месте, можно определить необходимую напряженность поля полезного сигнала.

В диапазонах КВ и УКВ действуют *промышленные* и *атмосферные помехи*, а в диапазоне УКВ, кроме того, *помехи космического происхождения*.

Источниками промышленных помех являются, во-первых, различного вида электроустановки, работа которых сопровождается искрением, и, во-вторых, радиостанции, излучающие высшие гармоники основной частоты, попадающие в рабочий диапазон более коротковолновых станций. Промышленные помехи особенно существенны в больших городах, где они определяют условия радиоприема в диапазоне волн 1—100 МГц. На более коротких волнах уровень промышленных помех, как правило, уменьшается. Уровень промышленных помех в каждом случае определяется с помощью специальных измерителей. Промышленные помехи стремятся подавлять в месте их возникновения путем применения фильтрации и экранирования, препятствующих как излучению радиоволн, так и распространению их по питающим проводам.

Основным источником атмосферных помех являются грозы. Во время грозового разряда возникает мощный импульс тока, имеющий длительность 0,1—3 мс. Такой импульс занимает широкую полосу частот, причем наибольшее значение имеет амплитуда напряженности поля в интервале частот 300—10 000 Гц.

В случае, когда помеха создается грозой, происходящей недалеко от приемного пункта (местной грозой), интенсивность помехи уменьшается обратно пропорционально частоте. Но основным источником помех являются грозы, происходящие в течение круглого года в экваториальных районах земного шара — очагах грозовой деятельности. Частотная зависимость интенсивности помех, создаваемых очагами грозовой деятельности, иная, чем от местных гроз, так как она определяется еще и условиями распространения радиоволн от места возникновения помехи до точки наблюдения.

Радиоволны различной длины, возникающие во время грозового разряда, распространяются подобно волнам соответствующих диапазонов. Измерения показали, что в ночные часы уровень помех выше, чем в дневные. Особенно резко это проявляется в диапазоне СВ. В диапазоне КВ в ночное время уровень помех выше на волнах длиной более 30 м, а в дневное — на волнах короче 20 м. На УКВ сказываются помехи только от местных гроз. Интенсивность атмосферных помех уменьшается с повышением географической широты.

КОСМИЧЕСКИЕ ПОМЕХИ

В диапазоне УКВ и особенно на космических радиолиниях существенное влияние оказывают космические помехи. Радиоизлучение, создаваемое внеземными источниками, называется космическим радиоизлучением, а создаваемые этим излучением помехи — космическими. Основным источником радиоизлучения является галактика, создающая фон радиоизлучения, на который накладывается излучение многих отдельных источников, таких как Солнце, Юпитер, Сатурн, Венера, Луна, звезды.

Радиоизлучение галактики наблюдается во всех направлениях, оно измерялось в диапазоне от средних до сантиметровых волн, на основании чего были построены карты распределения радиоизлучения по небесной сфере.

На рис. 20 приведена частотная зависимость напряженности поля радиоизлучения галактики для участков ее максимального и минимального излучения. Поскольку помехи галактики уменьшаются с повышением частоты, а помехи приемника возрастают, на частотах выше 150—200 МГц определяющими являются собственные шумы приемника. В диапазоне частот 30—18 МГц определяющими являются шумы галактики, а на более низких частотах — помехи, создаваемые грозовыми разрядами. Уровень галактических помех весьма постоянен, но за счет вращения Земли в данной точке земной поверхности наблюдается суточное изменение уровня этих помех.

Радиоизлучение Солнца и планет имеет второстепенное значение по сравнению с излучением галактики, поскольку оно создает существенные помехи только

в том случае, когда антенна направлена на источник излучения. Солнце излучает в широком диапазоне радиочастот. Интенсивность излучения резко возрастает во время возмущений на Солнце и в годы максимумов солнечной деятельности. Уровень радиоизлучения Солнца может служить более строгим критерием деятельности Солнца, чем число солнечных пятен.

Источниками более слабого радиоизлучения являются планеты Юпитер, Венера, Сатурн, Марс, Луна, а также радиотуманности Кассиопея, Лебедь, Телец и кометы.

Поверхность Земли также является источником радиоизлучения, которое может быть

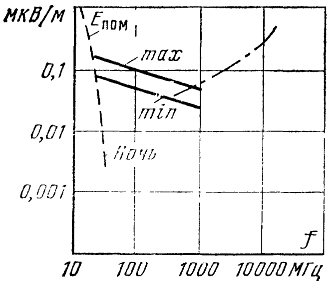




Рис. 20. Напряженность поля помех в полосе частот 1 кГц.

——— — излучение галактики; —·—·—— излучение атмосферы Земли; ——— — атмосферные помехи.

принято боковыми лепестками диаграмм направленности антенн, расположенных на Земле, или антеннами космических кораблей, направленных к Земле.

Помехи создаются также излучением атмосферы Земли. На рис. 20 представлена частотная зависимость помех радиоизлучения атмосферы Земли. Атмосферный шум проявляется на частотах 1000—20 000 МГц и выше, где он преобладает над галактическим шумом и является практически единственным видом помех.

Для обеспечения надежной работы любой радиолинии необходимо правильно выбирать мощности передатчиков и типы антенн, чтобы выдерживалось необходимое отношение сигнал/помеха. Так, например, при приеме телевидения желательно иметь отношение сигнал/помеха не менее 30 дБ. При этом напряженность поля сигнала должна быть от 100 мкВ/м в диапазоне частот 50—80 МГц до 1000 мкВ/м в диапазоне частот выше 200 МГц. В городах, где имеются сильные источники помех, напряженность поля должна достигать 5000 мкВ/м. Поэтому в крупных городах для передач телевидения приходится применять сравнительно мощные передатчики.

КОРОТКИЕ ВОЛНЫ

РЕГУЛЯРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ КВ

К коротким — декаметровым — волнам (КВ) относят радиоволны длиной от 100 до 10 м (частота колебаний 3—30 МГц).

В 20-х годах когда еще не было выяснено влияние ионосферы на распространение радиоволн, считали, что все волны короче 200 м непригодны для радиосвязи на большие расстояния. Поэтому весь этот диапазон был передан радиолюбителям. Естественно, что, основываясь на таком представлении, радиолюбители также старались работать на волнах как можно ближе к 200 м. Однако со временем многие радиолюбители стали работать на более коротких волнах, и к всеобщему удивлению условия радиосвязи на этих волнах оказались лучше. После выяснения преимуществ КВ было организовано новое распределение частот между радиостанциями всех стран мира.

В 20-х годах началось широкое использование коротких радиоволн для дальней связи. В 1924 г. под руководством советского ученого М. А. Бонч-Бруевича в Нижнегородской (Горьковской) радиолаборатории проводились первые в Советском Союзе опыты по связи на коротких волнах, закончившиеся организацией линии радиосвязи Москва — Ташкент, а в 1925 г. проводились такие же работы на линии Ленинград — Тбилиси. Большой вклад в исследование распространения КВ сделал М. В. Шулейкин.

В настоящее время КВ применяются главным образом для связи и радиовещания на расстояния, достигающие тысяч километров, причем передатчики мо-

гут иметь небольшую мощность. На КВ можно создать направленные антенны, т. е. сконцентрировать излучаемую энергию в нужном направлении. Вид передающей коротковолновой антенны показан на рис. 21.

Радиолюбителям выделено в КВ диапазоне ряд частот: 1,85—1,95; 3,5—3,65; 7,0—7,1; 14,0—14,35; 21,0—21,45; 28—29,7 МГц. Работа радиолюбителей-коротковолновиков по установлению дальних радиосвязей способствует дальнейшему исследованию особенностей распространения КВ и возможностей его использования.

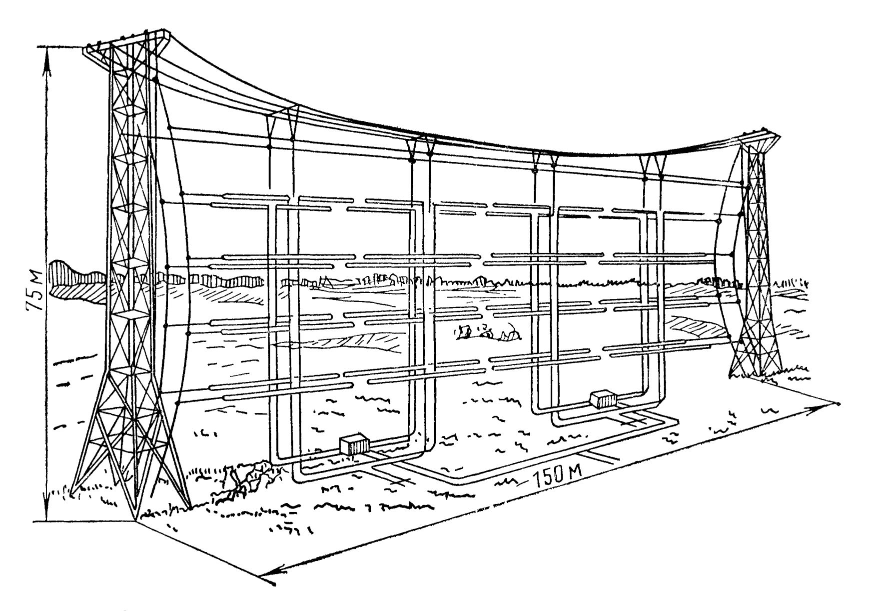


Рис. 21. Антенна коротковолнового диапазона.

Короткие радиоволны распространяются на большие расстояния путем отражения от ионосферы и поверхности Земли, как это иллюстрирует рис. 22. Такой способ распространения называют скачковым и характеризуют расстоянием скачка r_{c1}, r_{c2}, ..., r_{cn} и n — числом скачков. Расстояние скачка зависит от высоты отражающего слоя, рабочей частоты и диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости, оно меняется в зависимости от времени года, сезона и активности Солнца.

Короткие волны могут отражаться на разных высотах в ионосфере. Нижняя граница области отражения лежит вблизи максимума электронной плотности слоя E на высоте 100—120 км, верхняя граница — несколько ниже максимума слоя F_2, на высоте 300—400 км. В среднем максимальное расстояние скачка принимают равным при отражении от слоя F_2 — 4000 км, при отражении от слоя F_1 — 3000 км, при отражении от слоя E — 2000 км. Максимальное расстояние скачка имеет место при направлении излучения волны по касательной к горизонту, однако у реальных антенн максимум излучения направлен под некоторым углом к горизонту (рис. 22), что приводит к уменьшению максимального расстояния скачка. Кроме того, антенна излучает в некотором интервале углов, соответствующем ширине диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости и составляющем 10—15°. Поэтому одна антенна посылает волны одной и той же частоты, направленные под различными углами возвышения. Вспомним формулу (9), которая показывает, что волны, посланные под разными углами возвышения, отражаются при различной электронной плотности, т. е. на разной высоте в ионосфере. Поэтому волны на данной радиотрассе могут распространяться различными путями и к приемной антенне может приходить

несколько волн под разными углами возвышения. Примеры типичных путей распространения КВ приведены на рис. 23. Установить, каковы пути распространения радиоволн, удается только при проведении исследований специальной аппаратурой. На работающих радиолиниях очень трудно определить, каков путь волны, так как поле в месте приема имеет сложную структуру.

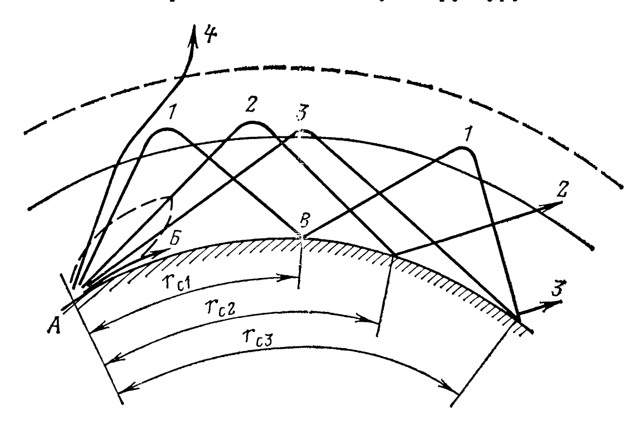


Рис. 22. Отражение КВ от ионосферы.

1 — волна, отразившаяся от ионосферы дважды; *2* — направление распространения волны совпадает с максимумом диаграммы направленности антенны; *3* — волна, распространяющаяся путем одного отражения от ионосферы; *4* — волна, частота которой выше максимально применимой частоты (МП частоты)

Следует еще сказать, что ионосфера неоднородна и в горизонтальном направлении. Ведь при большой протяженности радиотрассы местное время в начале и конце ее может быть различным, а значит, плотность ионосферы окажется неодинаковой. В горизонтально неоднородной ионосфере нарушается симметрия пути волны, изменяются расстояние скачка и условия отражения.

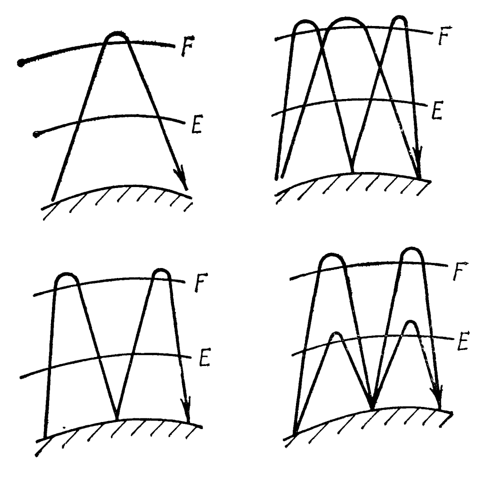


Рис. 23. Типичные пути распространения КВ.

Коротковолновая радиолиния может успешно работать при выполнении двух условий: во-первых, должно быть выполнено условие отражения волны от ионосферы и, во-вторых, напряженность поля полезного сигнала в данном месте должна превышать уровень помех. Отражение волны произойдет, если рабочая частота не превосходит значения, определяемого формулой (9). Из этого условия выбирается *максимальная применимая частота* (МПЧ), являющаяся верхней границей рабочего диапазона. Второе условие ограничивает рабочий диапазон снизу: чем ниже рабочая частота (в пределах КВ диапазона), тем сильнее поглощение волны в ионосфере.

Наименьшую применимую частоту (НПЧ) определяют из условия, что при данной мощности передатчика напряженность электрического поля сигнала должна превышать уровень помехи, следовательно, поглощение в ионосфере не должно быть больше допустимого.

Электронная плотность ионосферы меняется в течение суток и в течение года. Значит, изменяются и границы рабочего диапазона, что приводит к необходимости изменения рабочей длины волны в течение суток. Днем работают на волнах 10—25 м, а ночью на волнах 35—100 м. Понятно, что необходимость менять длину волны и каждый раз правильно выбирать ее усложняет как конструкцию станции, так и работу оператора.

Увеличение поглощения в дневные часы по сравнению с ночными проявилось при приеме в Антарктиде европейских коротковолновых станций. Советские операторы, работающие на радиостанции поселка «Мирный» отмечали изменение направления прихода наиболее сильного сигнала КВ в течение суток. Радиоволны всегда проходили по неосвещенной Солнцем стороне земного шара, хотя в течение части суток (когда освещено восточное полушарие) этот путь является более длинным. Волна, проходящая по освещенной части земного шара, почти полностью поглощалась в ионосфере.

Максимальные применимые частоты определяют по прогнозам о критических частотах и высотах ионосферных слоев. Частоты волн, отражающихся в случае наклонного f_{φ} и вертикального f_0 падения на слой с одной и той же электронной плотностью, связаны соотношением

$$f_{\varphi} = M\mathring{f}_{\varphi}\,, \qquad (11)$$

где M — коэффициент передачи; он зависит от протяженности радиолинии. Для коэффициента передачи принята запись, при которой перед буквой M ставится символ слоя, отражающего волны, а после — расстояние в километрах. В такой записи формула (11) для радиолинии протяженностью 3000 км принимает вид

$$F_2 - 3000 \text{ МПЧ} = (F_2 - M - 3000)\, f_{\text{кр}\, F_2}. \qquad (12)$$

Эта запись значит, что МПЧ при отражении от слоя F_2 и протяженности радиотрассы 3000 км равняется критической частоте $f_{\text{кр}\, F2}$, умноженной на коэффициент M для данного расстояния.

Для расчета МПЧ используют «Месячный прогноз распространения радиоволн», в котором публикуются карты мира с нанесенными на них значениями F_2 — 0 — МПЧ и F_2 — 4000 — МПЧ и номограммы для пересчета МПЧ на другие расстояния. На карту наносят радиотрассу и определяют критическую частоту в точках отражения радиоволн. Если трасса имеет протяженность не более 4000 км, то распространение осуществляется главным образом путем одного отражения волны от ионосферы в середине трассы.

На протяженных трассах расчет проводить сложнее. так как здесь могут одновременно приходить волны, распространяющиеся, например, путем трех или четырех отражений. В этом случае определяют положение так называемых контрольных точек, каждая из которых отстоит на 2000 км от концов радиолинии, и из двух значений МПЧ, полученных для этих точек в предположении, что расстояние скачка равно 4000 км (МПЧ — 4000), выбирают наименьшее. Вычисляя подобным образом МПЧ для каждого часа суток, строят суточный график изменения МПЧ.

Чтобы вследствие случайных изменений электронной плотности не произошло нарушение работы радиолинии, выбирают *оптимальные рабочие частоты* (ОРЧ), которые ниже МПЧ на 15% [1].

Метод расчета напряженности электрического поля на КВ и наименьших применимых частот НПЧ, наиболее соответствующий физической картине распространения КВ, предложен советским ученым А. Н. Казанцевым. В «Инструкции по расчету коротковолновых линий радиосвязи» [7] подробно изложен метод расчета напряженности поля и НПЧ.

Нанося на одном и том же графике суточные изменения МПЧ и НПЧ, получают представление о диапазоне рабочих частот, который можно применять в разное время суток. Пример такого графика для радиотрассы Москва — Вашингтон приведен на рис. 24.

Путем увеличения мощности передатчика можно снизить значение НПЧ. Для мощности передатчика 1 кВт и приеме на телефон график НПЧ (кривая *2*) почти все время проходит выше графика МПЧ (кривая *1*), т. е. в этих условиях бóльшую часть суток прохождение радиоволн невозможно. При уве-

личении мощности передатчика до 100 кВт НПЧ снижаются примерно на 4 МГц (кривая *3*). Переход к телеграфному приему, допускающему больший относительный уровень помех (кривая *4*), снижает НПЧ еще на 1—1,5 МГц. Приведенный пример показывает, что выбор рабочей частоты в КВ диапазоне является сложной, иногда неразрешимой задачей.

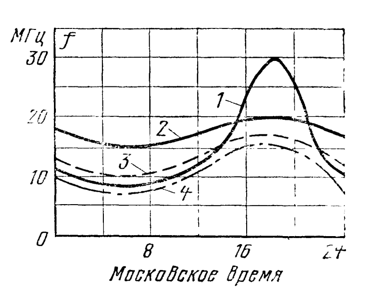


Рис. 24. Диапазон рабочих частот для радиотрассы Москва — Вашингтон.

1 — МПЧ; *2* — НПЧ для мощности передатчика 1 кВт при передаче телефонных сообщений; *3* — НПЧ для мощности передатчика 100 кВт при передаче телефонных сообщений; *4* — НПЧ для мощности передатчика 100 кВт при передаче телеграфом.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВ

Еще в первые годы использования КВ было обнаружено, что прием волн короче 50 м оказывался невозможным на расстояниях около 100 км, тогда как слышимость была исключительно хорошей на расстояниях в несколько тысяч километров. Область, в которой прием сигнала невозможен, была названа *зоной молчания*. Наличие зоны молчания объясняется тем, что КВ, распространяющиеся вблизи Земли, плохо огибают земной шар и сильно поглощаются земной поверхностью, так что уже на расстоянии около 100 км напряженность поля оказывается недостаточной для приема. На рис. 22 показано, что волна, распространяющаяся вдоль поверхности земли из точки *А*, может быть принята только на участке *АБ*. В то же время от ионосферы КВ могут отражаться только в том случае, если они падают достаточно полого на ионосферный слой. Такие волны, отражаясь, проходят большое расстояние и попадают в точку *В* и дальше, на меньшие же расстояния от передающей станции эти волны на поверхность земли не приходят.

В результате на некоторой части трассы *БВ* прием радиоволн невозможен; этот участок называется зоной молчания. Чем короче волна, тем шире зона молчания. Наличие зон молчания часто отмечается радиолюбителями-коротковолновиками. Им известно, что хорошо налаживается связь с корреспондентом, удаленным на 2000—3000 км, и невозможно осуществить связь с корреспондентом, находящимся на расстоянии 200—300 км.

Неприятное явление при работе на КВ — *замирания*. Изменения уровня сигнала получаются резкими и происходят часто. Это вызвано тем, что слой *F*, от которого отражаются КВ, неустойчив. Причиной замираний является то обстоятельство, что в место приема приходит несколько волн, проходящих различные пути, причем длина этих путей меняется. Для того чтобы фаза волны в диапазоне КВ изменилась на 180°, длина пути волны должна измениться менее чем на 50 м. Такие изменения высоты отражения в ионосфере могут происходить очень часто.

Для борьбы с замираниями применяют приемные антенны с узкой диаграммой направленности, ориентированной так, чтобы принималась только волна, пришедшая наиболее коротким путем. Направление прихода волны может меняться в течение суток. Поэтому необходимо предусмотреть возможность изменения направления максимума диаграммы направленности антенны. При этом приемная антенна получается сложной и громоздкой.

Можно эффективно осуществлять прием на разнесенные антенны. Такой прием возможен потому, что увеличение и уменьшение напряженности поля, даже на сравнительно небольшой площади земной поверхности, происходят неодновременно. В то время как в месте расположения одной антенны уровень напряженности поля мал, около другой антенны, удаленной от первой на расстоя-

ние в несколько длин волн (сто или несколько сотен метров), напряженность поля велика. Таким образом, на выходе одной из двух антенн напряжение окажется достаточным для приема. При таком радиоприеме сигналы суммируются по низкой частоте после детектирования.

Особенностью распространения КВ является *дальнее наземное рассеяние* КВ на участках поверхности Земли. Это явление поясняется на рис. 25, *а*. Излучаемые антенной радиопередающего устройства радиоволны *1* отражаются от ионосферы и попадают на Землю в точку *Б*. На поверхности Земли всегда имеются значительные неровности (холмы, деревья, строения). Поэтому не вся энергия волны отражаются зеркально, а часть ее рассеивается во всех направлениях (*2*—*5*). Рассеянные неоднородностями волны частично вновь отражаются от ионосферы и возвращаются на Землю, причем какая-то доля энергии направляется обратно (*5*) в то место, где находится радиопередающее устройство.

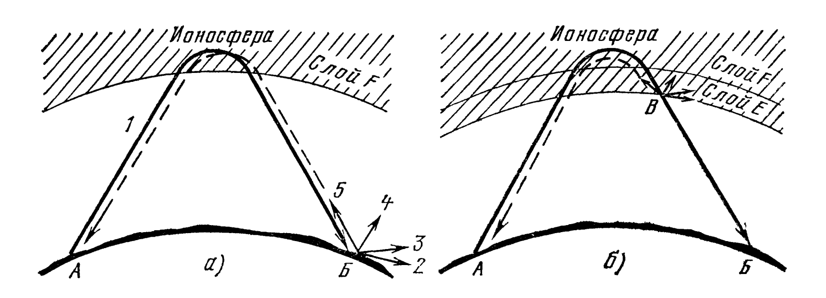


Рис. 25. Дальнее наземное рассеяние КВ.
а — действительная схема рассеяния; *б* — ошибочная схема Эккерлея.

Интересная история исследования вопроса о рассеянии КВ. Еще в 1926—1930 гг. было замечено, что прием сигналов, излучаемых мощными КВ станциями, наблюдается в «зоне молчания». Кроме того, были замечены ошибки пеленга КВ станций. Специальные опыты показали, что эти явления объясняются рассеянием радиоволн. Однако до 1946 г. исследователи затруднялись ответить на вопрос, где же происходит это рассеянное отражение. Английский ученый Т. Л. Эккерлей открыл и исследовал рассеяние радиоволн на неоднородностях слоя *Е*, которое в настоящее время широко используется для дальней связи на метровых волнах. Источником рассеяния коротких волн Эккерлей также считал слой *Е* в точке *В* (рис. 25, *б*). Возможность того, что дальние рассеянные отражения являются результатом рассеяния радиоволн неровностями земной поверхности, Т. Л. Эккерлей категорически отрицал. Авторитет Эккерлея был настолько велик, что в течение 20 лет никто не был в состоянии опровергнуть его мнение, хотя многие исследователи занимались этим вопросом. Только в 1946 г. советский исследователь Н. И. Кабанов доказал, что дальние возвратные отражения КВ обусловлены рассеянием на неоднородностях поверхности Земли, на которую падают КВ, отразившиеся от ионосферы.

Рис. 26. Осциллограмма возвратно-рассеянного сигнала.

Правильное определение места рассеяния КВ позволило использовать рассеянные отражения для определения частот, на которых следует вести связь в данное время. Для этого перед началом основного сеанса передачи несколько минут передают сигнал, промодулированный импульсами. Оператор на специальном осциллографе наблюдает за величиной принятого сигнала, созданного рассеянным отражением. Горизонтальная развертка осциллографа проградуирована в километрах. Вид осциллограммы такого сигнала показан на рис. 26.

Присутствие сигнала на осциллографе указывает на то, что излучаемые антенной волны проходят, а верхняя граница применимых частот не пройдена. По величине этого сигнала можно судить о напряженности поля в месте приема, а по шкале расстояний можно определить, облучается ли нужная область территории. Такой метод определения рабочей частоты называется методом возвратно-наклонного зондирования — ВНЗ. Метод ВНЗ позволяет быстро и точно выбрать для связи нужную рабочую частоту, что особенно трудно сделать другим способом на протяженных линиях связи. Таким образом, явление рассеяния КВ, казавшееся на первых порах вредным, теперь успешно используется для контроля работы радиолиний связи. Система ВНЗ работает на линии связи Москва — Хабаровск.

НЕРЕГУЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ КВ

Работа коротковолновых радиолиний сопровождается частыми нарушениями, которые возникают в результате ионосферных возмущений. Основной причиной нарушения работы коротковолновых радиолиний являются ионосферно-магнитные бури, причина возникновения которых заключается в изменении деятельности Солнца. На Солнце время от времени происходят своеобразные вспышки, сопровождаемые извержением потоков заряженных частиц. Частицы, попадая в атмосферу Земли, движутся под действием земного магнитного поля главным образом к полярным районам. Сильные потоки заряженных частиц нарушают нормальное состояние ионизированных слоев, и при этом одновременно изменяется магнитное поле Земли, поскольку его величина в некоторой степени связана с движением зарядов в ионосфере.

Во время ионосферно-магнитной бури наибольшие изменения происходят в слое F, при этом электронная плотность слоя уменьшается и отражение КВ становится невозможным. Нижние слои E и D практически не изменяются, так как заряженные частицы сюда не проникают.

Работа радиолинии прежде всего нарушается на наиболее высоких частотах, а восстанавливается раньше на низких частотах. Наиболее часто ионосферно-магнитные бури бывают на севере, при сильных возмущениях приходится прибегать к ретрансляции по линиям, проходящим в районах более низких широт. Нарушения, вызванные ионосферно-магнитными бурями, длятся от нескольких часов до двух суток. Существуют методы прогнозирования ионосферно-магнитных бурь на основании наблюдений за деятельностью Солнца. При увеличении числа солнечных пятен учащается появление ионосферно-магнитной бури и нарушение работы КВ радиолиний.

Появление спорадического слоя E_c также может привести к нарушению работы КВ радиолиний. Действительно, при появлении на пути распространения волны плотного слоя E_c отражение происходит от этого слоя на высоте 100 км, а не от слоя F на высоте 200—300 км. Отраженная волна проходит меньшее расстояние и не достигнет корреспондента.

В некоторых случаях наблюдается увеличение напряженности поля КВ по сравнению с обычной напряженностью поля. Короткие волны при благоприятных условиях могут распространяться на очень большие расстояния. Нередко наблюдаются случаи, когда КВ один или несколько раз огибают земной шар и могут быть приняты в том же пункте, где ведется прием основного сигнала. Напряженность поля сигнала, обогнувшего земной шар, достаточно велика для приема, но сигнал приходит с запозданием примерно на 0,1 с. Значит, если не принять специальных мер, то окажутся одновременно принятыми два сигнала: основной и его «эхо». Это явление так и называется радиоэхо. Особенно сильное мешающее действие *радиоэхо* оказывает на длинных линиях связи, например на линии Москва — Хабаровск, где оно и было подробно исследовано.

Для радиолинии между наземной станцией и искусственным спутником также применимы короткие радиоволны, если спутник движется на высоте не более 200—250 км, ниже слоя F. Радиоволны, излучаемые антенной, находящейся на спутнике, распространяются, отражаясь от поверхности Земли и ионосферы, и как бы обтекают со всех сторон земной шар, как схематически показано на рис. 27, *а*. При благоприятных условиях распространения поля волн, пришедших с разных сторон в точку, диаметрально противополож-

ную местонахождению спутника (точку антипода), складываются и сигнал усиливается.

На рис. 27, *б* представлена запись амплитуды сигнала первого искусственного спутника, передатчик которого работал на волне частотой около 20 МГц.

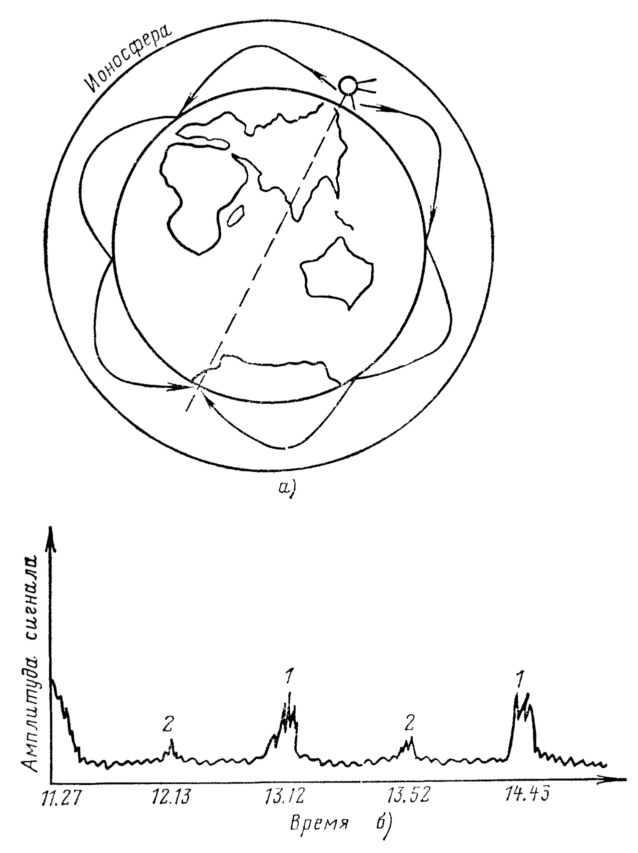


Рис. 27. Эффект антипода.
а — пути распространения радиоволн; *б* — запись сигнала первого ИСЗ.

Резкое увеличение уровня сигнала, принимаемого наземной станцией, наблюдалось, когда спутник проходил над пунктом приема *1* и над точкой антипода *2*. Это явление называется *эффект антипода*.

УЛЬТРАКОРОТКИЕ ВОЛНЫ

ПРИМЕНЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УКВ

Диапазон УКВ очень широк. Со стороны низких частот диапазон УКВ примыкает к КВ, а со стороны высоких — граничит с длинными инфракрасными волнами. Граница УКВ 10 м была определена тем, что, как ранее считалось, на эти волны ионосфера, как правило, уже не оказывает влияния, и они могут распространяться только на небольшие расстояния.

Диапазон УКВ подразделяют на четыре поддиапазона: метровые волны (10—1 м), дециметровые (1 м — 10 см), сантиметровые (10—1 см) и миллимет-

ровые (короче 1 см). Каждый из этих поддиапазонов находит свое применение в технике. Так, диапазон метровых волн используется для телевидения, частотно-модулированного вещания, навигации, радиоастрономии, радиосвязи на сверхдальние расстояния. Диапазоны дециметровых и сантиметровых волн используются в телевидении, радиолокации, многоканальной связи, на космических радиолиниях различного назначения. Диапазон миллиметровых волн с каждым годом осваивается все шире и находит применение в радиолокации и для передачи широкополосных сигналов на небольшие расстояния.

Радиолюбителям выделены для работы полосы частот во всех поддиапазонах: в метровом 144—146 МГц; в дециметровом 430—440 и 1215—1300 МГц; в сантиметровом 5,65—5,67, 10,0—10,5, 21,0—22,0 ГГц.

Широкая полоса частот может быть передана только на радиоволнах ультракоротковолнового диапазона. Все другие диапазоны, в частности коротковолновый, настолько загружены, что желательно перевести в диапазон УКВ возможно большее число радиолиний. Это тем более осуществимо, что регулярное распространение УКВ на расстояние свыше 1000 км возможно, причем на УКВ радиолиниях в арктических районах не проявляются нарушения, свойственные КВ. В диапазоне УКВ возможно создание остронаправленных антенн с большим коэффициентом усиления, а значит, можно сконцентрировать излученную мощность в строго заданном направлении.

В изучении распространения УКВ за последние годы выполнено много теоретических и экспериментальных работ. Большой вклад в это дело внесли советские ученые Б. А. Введенский, В. А. Фок, М. А. Колосов и др. Многие вопросы, однако, еще не решены и требуют дальнейшей сложной теоретической, а также длительной и обширной экспериментальной работы.

Встречающиеся в практике случаи распространения УКВ удобно классифицировать следующим образом:

1. Распространение на небольшие расстояния (до 5—6 км), когда можно пренебречь сферичностью Земли и считать ее плоской.

2. Распространение на расстояния, не превышающие пределов видимого горизонта для реальных высот подъема антенн (до 80—100 км).

3. Распространение на те же расстояния (до 80—100 км), но в гористой местности или в большом городе, когда на пути распространения волны имеются значительные препятствия.

4. Тропосферное распространение радиоволн, т. е. распространение под влиянием нижних слоев атмосферы (до 200—600 км).

5. Ионосферное распространение радиоволн, вызываемое влиянием верхних ионизированных слоев атмосферы (свыше 1000 км).

6. Распространение на космических радиолиниях в пределах и за пределами атмосферы Земли и в атмосферах других планет.

В соответствии с этой классификацией в настоящей и следующих главах рассмотрены особенности распространения УКВ.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ НА РАССТОЯНИЯ, МНОГО МЕНЬШИЕ ПРЕДЕЛА ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

Ультракороткие волны широко применяются на радиолиниях небольшой протяженности — в пределах прямой видимости. За этим пределом напряженность поля УКВ обычно резко уменьшается, так как дифракция в этом диапазоне сказывается значительно слабее, чем на более длинных волнах. Для увеличения дальности действия передач на УКВ антенны поднимают возможно выше над землей. Зная высоту, на которую подняты передающие и приемные антенны, можно на основании простых геометрических соображений легко определить расстояние прямой видимости (рис. 28).

Расстояние прямой видимости (в километрах) может быть вычислено по формуле

$$r_0 = \sqrt{2R}\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right) = 3{,}57\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right), \qquad (13)$$

где R — радиус земного шара (6370 км); h_1, h_2 — высоты передающей и приемной антенн, м.

Например, если ранее при приеме передач Московского телецентра, антенна которого была поднята на высоту примерно 150 м, применялась приемная антенна, расположенная на высоте 5 м, то предел прямой видимости составлял около 60 км. После того как была сооружена Останкинская башня и передающая антенна стала возвышаться почти на 500-метровой высоте, расстояние прямой видимости при той же высоте расположения приемной антенны превышает 90 км.

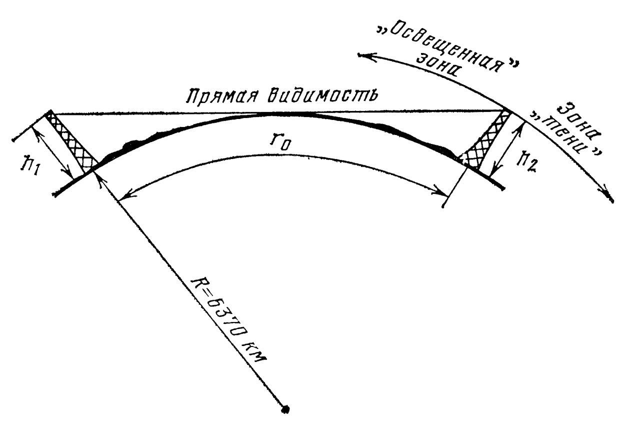


Рис. 28. К определению расстояния прямой видимости.

Первые исследования в области УКВ были направлены на выяснение условий их распространения в пределах прямой видимости на небольшие расстояния, когда на пути распространения волн нет гор, больших зданий и других существенных препятствий.

Впервые ответ на вопрос, как рассчитать напряженность поля УКВ и от чего она зависит, дал в 1922 г. Б. А. Введенский. Первые опыты проводились им на волне длиной 3,8 м на расстоянии в десятки метров. Б. А. Введенский показал, что на небольших расстояниях в любой точке поле складывается из двух волн: прямой и отраженной от земной поверхности. Даже если применяются остронаправленные антенны, имеет место волна, отраженная от Земли (рис. 29). При небольших расстояниях можно не учитывать кривизны земной поверхности и считать Землю плоской.

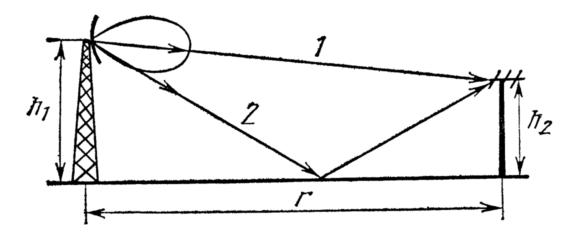


Рис. 29. Схема распространения УКВ на небольшие расстояния.

1 — прямая волна; *2* — волна, отраженная от поверхности Земли.

В зависимости от того, насколько различаются длины путей прямого и отраженного лучей, результирующее поле может оказаться больше или меньше поля каждой из составляющих. При небольших высотах антенны по сравнению с длиной трассы (этот случай обычно имеет место на практике) фаза волны при отражении от земной поверхности меняется на 180°. Таким образом, если разность длин путей прямого и отраженного лучей мала (меньше полуволны) или составляет целое число волн, поля вычитаются. Если же разность путей составляет целое число полуволн, то поля складываются.

Поле имеет в этом случае *интерференционный характер.* Напряженность поля изменяется с увеличением расстояния или высоты над земной поверхностью, периодически то увеличиваясь, то уменьшаясь. В результате диаграмма

направленности антенны в вертикальной плоскости носит лепестковый характер (рис. 30). Если приемную антенну поднимать выше линии, совпадающей с направлением максимального излучения первого лепестка передающей антенны, то напряженность поля начнет уменьшаться с поднятием приемной антенны над земной поверхностью. Поднимать антенну выше чем $h_{2\max}$ нецелесообразно:

$$h_{2\max} = \lambda r / 4h_1. \quad (14)$$

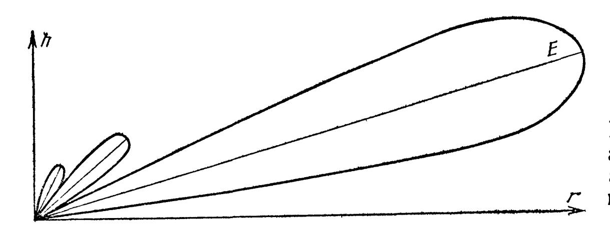


Рис. 30. Изрезанная диаграмма направленности антенны, получающаяся при интерференции прямой и отраженной волн.

Для расчета напряженности поля УКВ в том случае, когда приемная антенна расположена не на слишком большой высоте, так что она находится в области, соответствующей нижней части первого лепестка, имеется формула, называемая *отражательной:*

$$E = \frac{2{,}18 \sqrt{PG}\, h_1 h_2}{r^2 \lambda}, \quad (15)$$

где E — действующее значение напряженности поля в месте приема, мВ/м; P — мощность, излучаемая антенной, кВт; G — коэффициент усиления антенны; h_1, h_2 — высоты расположения передающей и приемной антенн, м; r — расстояние вдоль земной поверхности, км; λ — длина рабочей волны, м.

Формула (15) является основной для расчетов ультракоротковолновых радиолиний и определения пунктов размещения вещательных и телевизионных станций для расстояний, не превышающих предела прямой видимости. Она дает наглядную зависимость напряженности поля от длины волны, высот антенн и расстояния. Из этой формулы видно, что для увеличения напряженности поля следует выше поднимать передающую и приемную антенны. Напряженность поля с увеличением расстояния убывает по квадратичному закону.

Необходимо отметить, что формула (15) справедлива только для случая, когда антенны подняты достаточно высоко. Легко видеть, что если одна из антенн расположена на земной поверхности, т. е. h_1 или h_2 равно нулю, то и напряженность поля равна нулю, что не соответствует действительности. Для этого случая формула (15) неприменима.

Эта формула неприменима также для очень больших высот поднятия антенн. Применимость ее в этом случае ограничена условием

$$h_2 < r\lambda / 18 h_1. \quad (16)$$

Экспериментальная проверка справедливости формулы (15) производилась неоднократно измерением напряженности поля вдоль пути распространения волн. На рис. 31 приведен пример измерений напряженности поля в сопоставлении с расчетной кривой. Измерения проводились над ровной местностью на волне длиной 7,25 м. Высоты

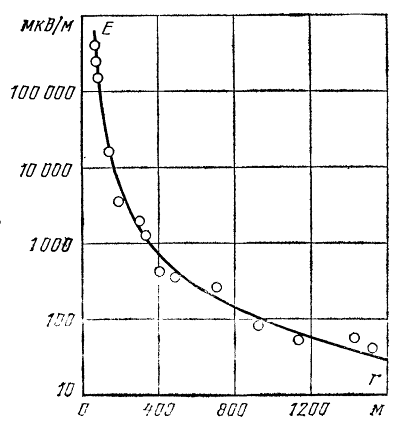


Рис. 31. Сопоставление расчетных и измеренных значений напряженности поля.

передающей и приемной антенн были соответственно 29 и 3,1 м. Результаты измерений отмечены точками. Линией нанесены результаты расчетов по формуле (15). Из рассмотрения рисунка следует, что расхождение между экспериментом и расчетом невелико. На небольших расстояниях сигнал, переданный на УКВ, получается сильным, устойчивым и не меняется в течение года и суток, что обеспечивает надежную работу радиолинии.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ НА РАССТОЯНИЯ, БЛИЗКИЕ К ПРЕДЕЛУ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

При увеличении расстояния нельзя пренебрегать влиянием кривизны земной поверхности. На рис. 32 изображена схема распространения УКВ для расстояний, при которых необходимо уже учитывать сферичность Земли.

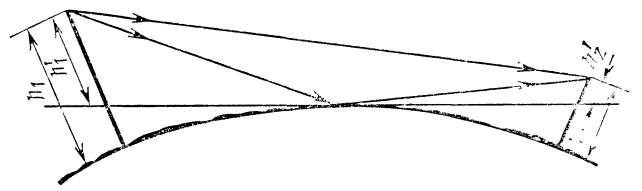


Рис. 32. Схема распространения УКВ на расстояния, при которых необходим учет сферичности Земли.

Из рисунка видно, что если в точке отражения радиоволн от земной поверхности провести плоскость, касательную к земному шару, и отсчитывать высоты антенн от этой плоскости, а не от поверхности Земли, то получим ту же схему распространения волн, что и в случае плоской земли. Разность хода лучей определится таким же образом, как и раньше. Следовательно, для определения напряженности поля в этом случае в формулу (15) вместо действительных высот антенн h_1 и h_2 следует подставлять так называемые приведенные высоты h'_1 и h'_2, равные расстоянию от точки подвеса антенны до плоскости, касательной к поверхности Земли в точке отражения. Приведенные высоты определяются из геометрических соображений.

При расчете напряженности поля по формуле (15) предполагалось, что волны распространяются прямолинейно. В действительности под влиянием неоднородностей тропосферы происходит рефракция волн, что затрудняет вычисление разности ходов прямой и отраженной волн.

Так как формула (15) проста, наглядна и хорошо проверена опытом, то оказалось целесообразным ввести в нее некоторые дополнения для учета явления рефракции. С этой целью было введено понятие *эквивалентного радиуса земного шара*, которое позволило приближенно учесть явление атмосферной рефракции.

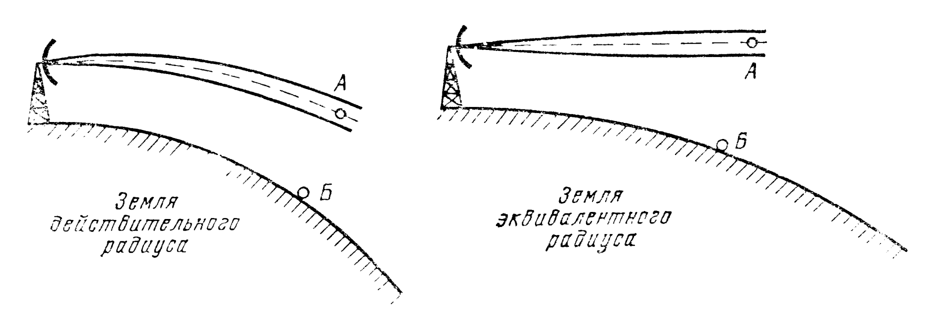


Рис. 33. Учет влияния рефракции путем замены действительного радиуса Земли эквивалентным.

На рис. 33 изображены сферическая поверхность Земли и расположенная над ней антенна. Излученная волна распространяется по некоторой кривой и в точке приема находится на расстоянии *АБ* от поверхности Земли. Представим себе, что волна распространяется не по кривой линии, а по прямой Для того чтобы она проходила при этом на той же высоте над поверхностью Земли, нужно, чтобы изменился радиус земного шара, т. е. нужно заменить действительный радиус земного шара *эквивалентным.*

Из геометрических соображений можно найти зависимость между кривизной траектории и эквивалентным радиусом земного шара. Кривизна траектории зависит от того, насколько изменяется коэффициент преломления атмосферы при подъеме на единицу высоты, например 1 м. Следовательно, от изменения коэффициента преломления атмосферы с высотой зависит и эквивалентный радиус земного шара $R_э$. Если траектория волны в атмосфере обращена выпуклостью вверх, то эквивалентный радиус земного шара оказывается больше действительного радиуса. Кажущееся увеличение радиуса земного шара учитывается коэффициентом k:

$$k = R_э/R. \tag{17}$$

Коэффициент k следующим образом связан с коэффициентом преломления атмосферы:

$$k = 1/(1 - 6{,}37 \cdot 10^6 \, \Delta n), \tag{18}$$

где Δn — изменение коэффициента преломления по высоте атмосферы при поднятии на 1 м.

Использование для расчетов эквивалентного радиуса земного шара дает усредненные значения напряженности поля и обеспечивает получение хороших результатов даже при отклонении закона изменения коэффициента преломления с высотой от линейного.

Как уже отмечалось, под влиянием атмосферной рефракции траектория волны из прямолинейной становится криволинейной. При этом в случае нормальной тропосферы волна проходит на меньшей высоте над Землей на сравнительно большом расстоянии. Таким образом, при тех же высотах антенн дальность прямой видимости увеличивается.

В случае нормальной тропосферы, когда $\Delta n = 4 \cdot 10^{-8}$ м, эквивалентный радиус земного шара в $k = 4/3$ раза больше действительного радиуса. В расчетах обычно и принимают это значение k, если только специальные измерения не показали, что коэффициент преломления атмосферы изменяется с высотой как-то иначе. Дальность прямой видимости (в километрах) определится как

$$r_{0\,э} = \sqrt{2Rk}\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right) = 4{,}12\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right), \tag{19}$$

т. е. под действием рефракции дальность прямой видимости возрастает на 15% (ср. с (13)).

В формуле (15) увеличение радиуса кривизны поверхности Земли учитывается в изменении приведенных высот антенны. При этом приведенная высота увеличивается, а следовательно, увеличивается и напряженность поля в точке приема.

Увеличение напряженности поля на расстояниях, близких к пределу прямой видимости, наблюдается в действительности. Учет влияния рефракции описанным образом дает хорошее совпадение с опытными данными.

Наблюдения за распространением УКВ показывают, что напряженность поля на расстояниях, близких к пределу прямой видимости, непостоянна. Напряженность поля меняется в зависимости от времени года, времени суток, ото дня ко дню. Кроме таких длительных колебаний, наблюдаются быстрые колебания в течение нескольких секунд или минут. Эти колебания называются *замираниями.*

Медленные колебания напряженности поля вызываются изменениями метеорологических условий. Меняются условия рефракции, кривизна траектории луча, а следовательно, и разность фаз прямой и отраженной волн. Быстрые колебания вызываются флуктуацией преломляющих свойств атмосферы. Под действием местного нагрева и движений в тропосфере преломляющие свойства атмосферы меняются — флуктуируют.

Измерения показали, что замирания на разных частотах не совпадают во времени. При приеме телевизионных передач на расстояниях, близких к пределу прямой видимости, наблюдаются периоды хорошего прохождения сигнала изображения и почти полного пропадания звукового сопровождения или наоборот.

ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Представление о гладкой поверхности земли всегда является условным. Обычно она далеко не ровная, и на пути распространения радиоволны встречаются различные препятствия: холмы, деревья, постройки и т. п. На рис. 34, *а* показана радиолиния, проходящая над неровной местностью, когда неровности местности лежат ниже прямой, соединяющей передающую и приемную антенны.

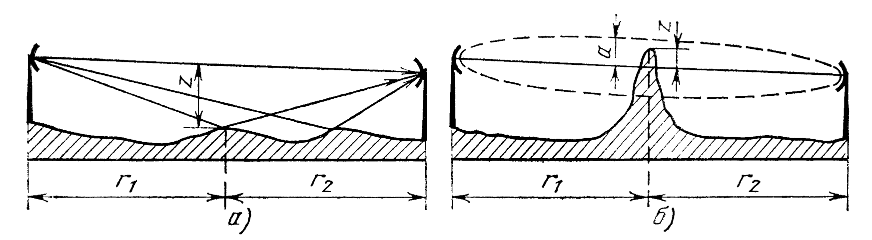


Рис. 34. Распространение радиоволн над неровной земной поверхностью.
а — открытая трасса; *б* — закрытая трасса.

Такая трасса называется *открытой*. В этом случае в точку приема могут приходить прямая волна и несколько (в данном случае две) волн, отраженных от поверхности земли, причем напряженность поля отраженных волн имеет различные фазы. В этом случае результирующая напряженность поля получается иной, чем при распространении волны над ровной поверхностью земли, когда имеется лишь одна отраженная волна.

Другой профиль неровной местности изображен на рис. 34, *б*, когда препятствие закрывает линию прямой видимости. Такая трасса называется *закрытой*. За препятствием образуется область тени, но за счет *дифракции* (огибания волнами препятствия) некоторая напряженность поля создается и в области тени.

Формула (15) хорошо согласуется с опытом, когда поверхность земли можно рассматривать как гладкую сферу. Если на пути распространения волны имеется одно явно выраженное препятствие — холм или высокое здание, то напряженность поля можно оценить, проведя расчет согласно дифракционной теории.

Приближенно напряженность дифракционного поля за препятствием можно вычислить по формуле, предложенной А. Н. Щукиным:

$$E = E_0 F, \qquad (20)$$

где E_0 — напряженность поля в свободном пространстве, определяемая по формуле (2); F — множитель ослабления, для определения которого можно воспользоваться графиком на рис. 35.

Параметр u (рис. 35) зависит от высоты «просвета» z (рис. 34, *б*), определяемого как расстояние между линией прямой видимости и вершиной препятствия. Для открытой трассы z считается положительным, а для закрытой — отрицательным. Кроме того, параметр u зависит от расстояния от передатчика до препятствия r_1 и от препятствия до приемника r_2, а также от длины волны λ:

$$u = z\left(\frac{2(r_2 + r_1)}{r_2 r_1 \lambda}\right)^{1/2}. \qquad (21)$$

Из рассмотрения графика на рис. 35 следует, что чем более закрыта трасса, тем меньше напряженность поля. Ослабляющее действие препятствия сказывается и тогда, когда вершина препятствия находится ниже линии прямой видимости. Это объясняется тем, что волны от передатчика к приемнику распространя-

ются как бы по фиктивному каналу, радиус которого a зависит от расстояния r_1 и r_2 и от длины волны:

$$a \approx \sqrt{r_1 r_2 \lambda / (r_1 + r_2)}\,, \qquad (22)$$

Такой канал схематически изображен пунктиром на рис. 34, *б*. Экранирующее действие препятствия сказывается тогда, когда препятствие начинает перекрывать поперечник канала. С другой стороны, пока не перекрыт весь поперечник канала, напряженность поля остается значительной. Представление о канале, по которому распространяются радиоволны, позволяют более правильно оценить влияние неровностей и препятствий на работу радиолинии.

В реальных условиях на пути распространения волны встречаются препятствия, различные по размерам и не имеющие строгой геометрической формы: холмы, деревья, строения и т. п. В этом случае расчет напряженности поля с учетом влияния всех этих препятствий и неровностей практически невозможен. Когда, например, проектируют размещение УКВ вещательной или телевизионной станции, то теоретический расчет может дать только ориентировочное представление о распределении напряженности поля на окружающей местности. Точное представление можно получить, только измерив напряженность поля на местности.

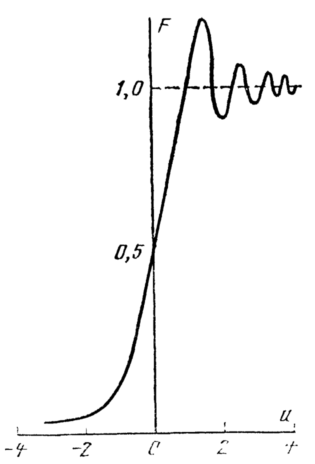


Рис. 35. График для определения множителя ослабления напряженности поля за препятствием.

Так, для того чтобы оценить, в каком радиусе возможен устойчивый прием передач Московского телецентра, измерялась напряженность поля вплоть до расстояний в 150 км. Результаты измерений представлены на рис. 36. Линиями обозначены границы зон, где сигнал превышал 1000, 300, 100 и 30 мкВ/м. По разным направлениям сигнал спадает неодинаково быстро. Сравнительно большое уменьшение уровня сигнала в направлении городов Дмитров и Клин объясняется экранирующим действием Клинско-Дмитровской гряды. Интересно, что на большем расстоянии, в районе Талдома, уровень сигнала снова возрастает до 100 мкВ/м.

Для выбора места расположения передатчика и оценки напряженности поля предварительно проводят измерения при помощи опытного передатчика, работающего на той же волне, что и действительный, но имеющего значительно меньшую мощность. Такие опыты проводились, например, в Англии. В этих опытах, кроме конкретных результатов — определения распределения напряженности поля заданной длины волны в данной местности, — получены интересные общие закономерности. Поэтому опишем эти опыты более подробно.

Измерения проводились на волнах около 2 и 0,5 м (частоты 102,6 и 593,6 МГц). Мощность передатчика была около 100 Вт. Измерения были выполнены по девяти радиальным направлениям вокруг передатчика на расстоянии до 70 км через каждые 8 км. Результаты измерений сильно зависели от выбора места расположения приемной антенны. Если антенна находилась на открытом месте, то отклонения при отдельных измерениях составляли 2—3 дБ. Среди высоких деревьев случайные отклонения напряженности поля от среднего значения доходили до 20 дБ. При этом на более короткой волне они были значительнее.

Напряженность поля сильно зависит от профиля местности. На рис. 37 изображен профиль местности по одному из направлений, на которых велись измерения, и на графике нанесены точки измерений напряженности поля. В начале трассы, где местность ровная, напряженность поля убывает плавно. Затем местность повышается до холма. На этом участке пути напряженность поля увеличивается с удалением от передатчика. За холмом напряженность поля резко убывает. Это — область тени. Дальше местность ровная. Интересно, что на этом участке пути напряженность поля не уменьшается с увеличением расстоя-

ния, а на протяжении почти 20 км остается постоянной. Это явление объясняется тем, что вершина холма служит как бы естественным ретранслятором. На поверхность земли за холмом приходят две волны: одна — прямая с вершины холма и вторая — отраженная от земли между холмом и приемником. При благоприятном соотношении фаз прямой и отраженной волн напряженность поля увеличивается, что в данном случае привело к компенсации уменьшения напряженности поля с расстоянием.

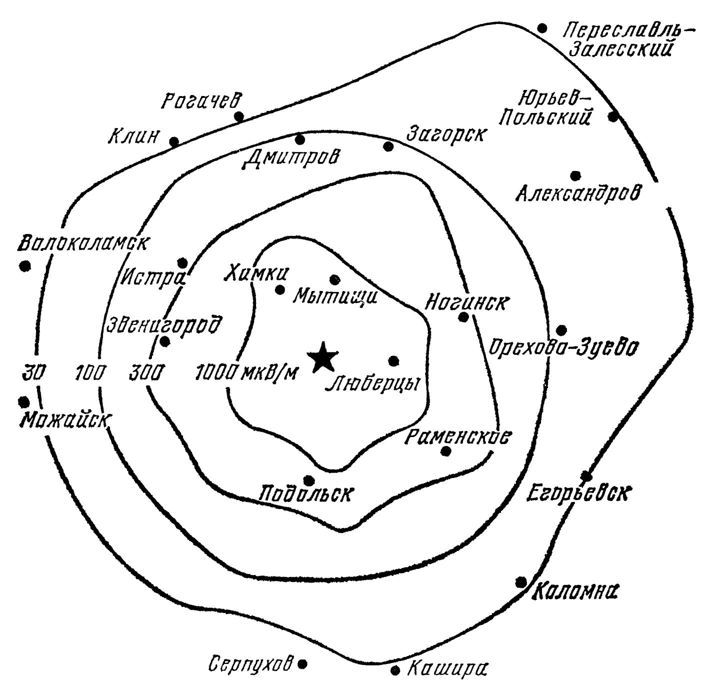


Рис. 36. Карта распределения напряженности поля Московского телецентра.

При измерениях было обнаружено, что на радиальных направлениях, проходящих через сильно застроенные района города (Лондона), напряженность поля в общем ниже, чем по другим направлениям на тех же расстояниях. Особенно сильно это сказывалось на волне 0,5 м. Разница составляла 15—20 дБ.

Когда поверхность земли неровная или антенна размещается над сильно застроенным районом, возникает вопрос: от какого уровня отсчитывать высоту антенны при расчете напряженности поля?

Как видно из формулы (15), расчетное значение напряженности поля значительно зависит от того, какая высота антенны будет выбрана. Некоторые исследователи полагают, что в случае пересеченной местности за высоту антенны следует принимать ее возвышение над средним уровнем, подсчитанным на расстоянии 3—10 км от антенны. Другие считают, что более правильно принимать действительную высоту антенны.

На рис. 38 приведено сопоставление расчетной кривой с данными, полученными из опыта. На волне 3 м измеренные значения отличаются от расчетных не более чем на 6 дБ. На волне 0,5 м разница значительно больше: она достигает 20—30 дБ. На этих графиках нанесены средние по всем направлениям значения, что исключает влияние специфики данной трассы. Измерения показали, что чем выше частота, тем больше расхождение результатов эксперимента с расчетом и тем ниже измеренная напряженность поля по сравнению с рассчитанной. Такие же результаты были получены и другими исследователями.

Путем обобщения результатов многих наблюдений была получена эмпирическая формула, позволяющая рассчитать поправку на неровность почвы. С повышением частоты разность между теоретическим и экспериментальным значениями напряженности поля, выраженная в децибелах, увеличивается пропорционально частоте. Это увеличение при расстояниях в пределах прямой видимости, грубо говоря, не зависит от расстояния до передатчика и высоты подъема

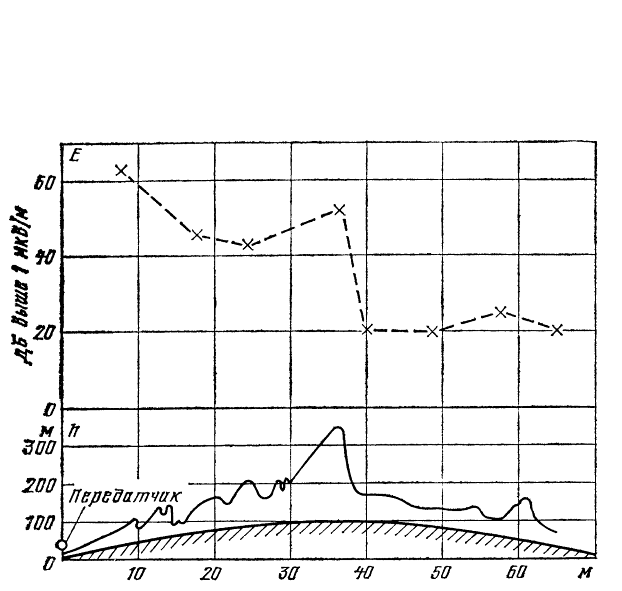


Рис. 37. Результаты измерения напряженности поля на волне частотой 593,6 МГц над неровной местностью.

Рис. 38. Сопоставление расчетных значений напряженности поля с измеренными над неровной местностью.

антенны. Путем экстраполяции экспериментальных значений получена формула для определения среднего значения напряженности поля E при пересеченной местности для диапазона частот 50—100 МГц:

$$20 \lg E/E_p = 37 - 20 \lg f, \qquad (23)$$

где E_p — напряженность поля, рассчитанная для ровной поверхности земли, мВ/м; f — частота, МГц.

При ровной поверхности земли напряженность поля увеличивается с укорочением длины волны. Это следует из формулы (15). В реальных условиях наличие неровностей приводит к компенсации этого увеличения и напряженность поля почти не зависит от частоты.

В сильно гористой местности расчет, даже с учетом поправок, дает очень грубое приближение к действительности. Часто бывает трудно оценить места, где прием будет слабым и неуверенным. Для выяснения таких мест и выбора наилучшего места расположения передающей антенны применяется следующий способ.

Изготовляют рельефный макет местности со всеми возвышенностями и неровностями. В предполагаемое место расположения антенны помещают небольшую лампочку. Интенсивность света на рельефной карте характеризует напряженность поля УКВ передатчика на местности. Если сфотографировать этот

макет и карту местности в одном и том же масштабе, а затем наложить диапозитивы и сделать общий отпечаток, то получится карта распределения напряженности поля. Перемещая лампочку (передатчик), можно выбрать наивыгоднейшее место расположения передатчика. Такой способ был применен для выбора места расположения вещательной УКВ станции в Граце (Австрия).

Нередко бывает необходимо наладить связь или желательно вести прием телевизионных передач в холмистой местности, причем приемный пункт оказывается расположенным за холмом в области тени. Тогда напряженность поля может оказаться недостаточной для приема. Для того чтобы прием был возможен, обычно применяется один из следующих способов.

На склоне холма, обращенном в сторону передатчика, близко к вершине устанавливают приемную антенну (рис. 39, *а*). Сигнал от приемной антенны подается на предварительный усилитель, а затем по кабелю на мощный усилитель и передающую антенну, обращенную в сторону приемного пункта. Техническая трудность заключается в устранении обратной связи между передающей

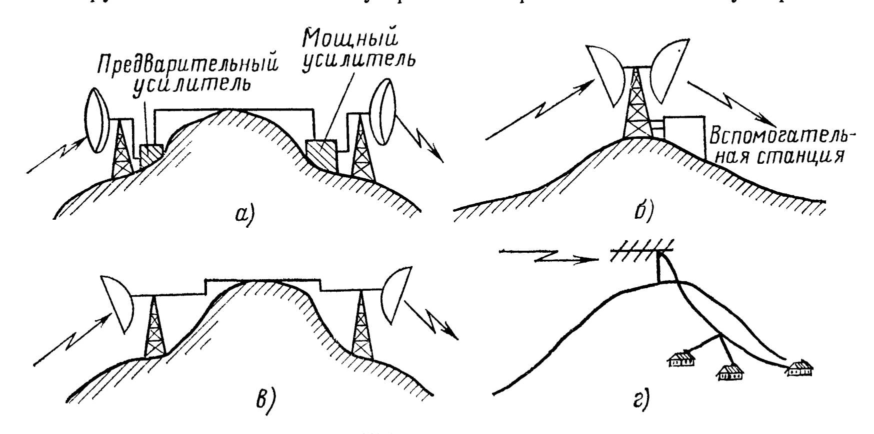


Рис. 39. Способы приема УКВ в области тени.

и приемной антеннами, если мощный передатчик работает на волне, на которую настроен приемник. Для устранения обратной связи передающую антенну относят на несколько десятков метров от приемной и располагают их на разных склонах холма. В этом случае требуются источник питания и постоянное обслуживание установки. Но все-таки этот способ достаточно прост и дешев. Такая система может ретранслировать только одну программу.

Можно использовать вспомогательный передатчик, который работал бы на волне, отличной от волны основной станции (рис. 39, *б*). В этом случае устраняется опасность возникновения обратной связи. Приемную и передающую антенны не нужно разносить на большие расстояния. Сигнал с приемной антенны усиливается и детектируется в приемнике, а затем модулирует вспомогательный передатчик. Оборудование требуется более сложное, необходимы источники питания и обслуживание. Такая система тоже может ретранслировать одновременно только одну программу. Для приема другой программы необходимо перестроить приемник.

Наиболее простым способом является применение пассивного ретранслятора (рис. 39, *в*). Антенну с большим коэффициентом усиления располагают на вершине холма в пределах прямой видимости передатчика. Сигнал от приемной антенны подается непосредственно на передающую антенну, расположенную в пределах прямой видимости приемного пункта. Этот способ можно применять только при наличии достаточно сильного сигнала и только в том случае, когда расстояние от передатчика до ретранслятора значительно больше, чем от ретранслятора до приемника. Пассивный ретранслятор имеет ряд преимуществ. Для него не нужны источники питания, он прост и дешев и не требует постоянного обслуживания. Большим его преимуществом является то, что он может ретранслировать одновременно несколько программ.

Для приема телевизионных передач в поселке, расположенном за холмом на небольшом расстоянии от вершины холма, целесообразно применить коллективную антенну (рис. 39, *г*). Сигнал от антенны можно подать на предварительный усилитель и затем по общему фидеру в поселок.

При проектировании УКВ станций необходимо знать, какова будет напряженность поля в городских условиях. Большой город представляет собой сильно пересеченную местность. В точку приема может приходить несколько волн, отраженных от различных зданий и сооружений. Даже в том случае, когда между передающей и приемной антеннами имеется прямая видимость, поле в точке приема носит очень сложный характер. Характер электромагнитного поля в городе может меняться не только от точки к точке, но и во времени из-за отражения радиоволн от движущегося транспорта (трамваев, автомобилей). При движении транспорта меняется расположение «неровностей» и напряженность поля изменяется. Часто наблюдается, что когда приемная антенна расположена невысоко (1-й и 2-й этажи), принимается не прямой сигнал, а отраженный от большого здания, расположенного поблизости.

Еще сложнее структура поля в помещениях. Комнатную антенну для получения наилучшего приема далеко не всегда приходится размещать в направлении на телецентр. В помещении перемещение антенны на несколько метров часто приводит к существенному изменению условий приема. Понятно, что при такой сложной картине поля и таком большом числе влияющих на него факторов нельзя дать точную формулу для расчетов напряженности поля. Оценить хотя бы приблизительно среднее значение напряженности поля можно по эмпирическим формулам, полученным на основании обобщения большого количества опытных данных. Опыт показывает, что в среднем в условиях большого города для оценок может быть использована формула (15), но полученные по ней значения нужно помножить на некоторый коэффициент, меньший 1. Численные значения этого коэффициента колеблются от 0,25 до 0,4. При этом высоту антенн следует отсчитывать от поверхности земли. Даже в этом случае будет получено только приближенное значение напряженности поля.

ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ

Лесами покрыто 55,5% всей территории Советского Союза, причем половина из них хвойные и половина лиственные. Отдельные деревья и лес оказывают влияние на работу УКВ радиолиний, являясь полупрозрачным препятствием для распространения радиоволн. Ствол дерева и ветви состоят из древесины, влажность которой изменяется от сезона к сезону и зависит от климатических условий. Диэлектрическая проницаемость древесины и проводимость несколько меньше, чем эти же параметры соленой воды. Крона деревьев состоит из хвои или листьев, вещество которых тоже представляется полупроводником. Если на пути распространения волны имеется одиночное дерево или небольшая группа деревьев, то радиоволны частично отражаются от этого препятствия, дифрагируют на нем, огибая его, а частично проникают через дерево, поглощаясь в древесине и кроне. Специальные измерения проводились на волне длиной 80 см. Два дерева облучались наземной антенной, а приемная аппаратура была установлена на самолете, который облетал деревья по окружности на небольшой высоте. В результате было получено распределение поля в горизонтальной плоскости вокруг деревьев, показанное на рис. 40. По радиусам отложена напряженность поля в децибелах по отношению к полю прямой волны, не ослабленной деревом. Видно, что распределение поля имеет своеобразную причудливую форму. Понятно, что расчет напряженности поля за таким препятствием можно провести только приближенно. При расчете предполагают, что дерево непрозрачно для радиоволн, и расчет ведут так же, как для поля за горой или домом.

При распространении в лесу поле радиоволн испытывает дополнительное ослабление. Сложность измерения этого ослабления заключается в том, что ослабление зависит не только от рабочей частоты, но и от густоты леса, породы деревьев, времени года. Подробные измерения проводились, например, в Австралии одновременно на волнах длиной 7 и 70 см. Передающая и приемная антенны располагались в лиственном лесу, и измерялось затухание в зависимости от высоты подъема антенн. Приблизительно с 3 до 18 м антенны находились в кро-

нах деревьев, и при этом сигнал был наиболее слабым. Волна длиной 7 см поглощается в лесу значительно сильнее, чем волна длиной 70 см. Такие же измерения проводились после опадения листвы. Оказалось, что поглощение на волне 70 см изменилось мало, а на волне 7 см уменьшилось примерно на 15—20 дБ. Это позволило сделать вывод, что сантиметровые радиоволны поглоща-

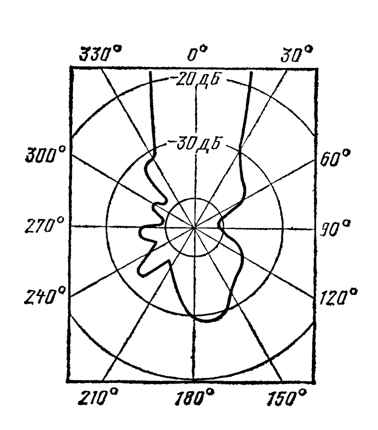


Рис. 40. Распределение напряженности поля вокруг деревьев.

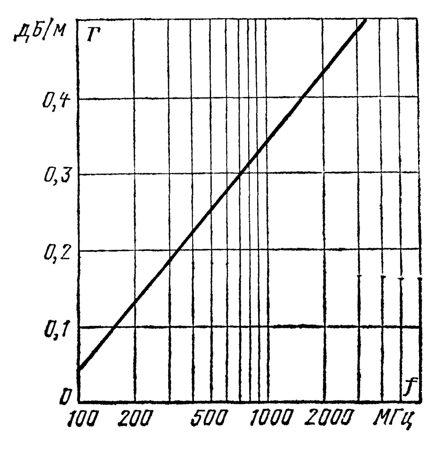


Рис. 41. Поглощение радиоволн в лесу.

ются главным образом в листве, а более длинные — в стволах и сучьях деревьев, причем поглощение уменьшается с увеличением длины волны. Практически лиственный лес зимой не вызывает дополнительного ослабления поля сантиметровых радиоволн.

Обобщение и обработка результатов измерений напряженности поля радиоволн в лесу, проведенных многими исследователями, позволили дать рекомендации для расчета напряженности поля. На рис. 41 представлен график зависимости поглощения радиоволн в густом влажном лесу на протяжении 1 м пути (децибелы на метр) в зависимости от рабочей частоты. Это некоторые усредненные значения поглощения, по которым можно получить только приблизительную оценку напряженности поля. На основании этого графика можно сказать, например, что если на пути распространения волны длиной 10 см имеется полоса леса шириной 1 км, то практически произойдет полное поглощение радиоволн. В сухом редком лесу поглощение может быть в 2 раза меньшим.

Если антенны расположены выше леса, то поглощения не будет, но отражение радиоволн происходит не от поверхности земли, а от крон деревьев. При ветре кроны колеблются и высота отражения меняется, что приводит к изменению разности фаз прямой и отраженной волн, а следовательно, и колебанию амплитуды напряженности результирующего поля.

Кустарник и трава также влияют на работу радиолинии, правда, в основном на сантиметровых и миллиметровых волнах. В зависимости от характера растительности, ее высоты, влажности меняется характер отражения радиоволн, причем обычно более влажная растительность действует как ровная поверхность, а сухая как шероховатая.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ НА РАССТОЯНИЯ, ПРЕВЫШАЮЩИЕ ПРЕДЕЛ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

С увеличением мощности передающих устройств и повышением чувствительности приемников стал возможным прием УКВ за пределами прямой видимости. Теоретически было показано, что появление на таких расстояниях по-

ля небольшой напряженности может быть объяснено дифракцией УКВ. Однако наблюдавшиеся напряженности поля превосходили уровни, рассчитанные по законам дифракции. Оказалось, что такое увеличение напряженности поля происходит благодаря процессам, происходящим в тропосфере.

Дифракция играет существенную роль в том случае, когда препятствие меньше или соизмеримо с длиной волны. Кривизна земного шара представляет препятствие для распространения радиоволн, притом препятствие весьма больших размеров. Поэтому УКВ плохо дифрагируют вокруг выпуклой поверхности земли. Но все-таки за счет дифракции УКВ могут распространяться за пределы прямой видимости в область тени. Строгое решение вопроса об определении напряженности поля дифракции было получено советским ученым В. А. Фоком.

Напряженность поля в точке приема в зоне дифракции, как и в пределах прямой видимости, увеличивается с поднятием передающей и приемной антенн. При укорочении длины волны напряженность поля очень резко уменьшается.

На рис. 42 показан расчетный график зависимости напряженности поля от расстояния для длин волн от 7 м до 7 мм. Принято, что передающая и приемная антенны помещены на высоте 100 м. Тогда предел прямой видимости составляет 71 км. Напряженность поля отложена в относительных единицах в логарифмическом масштабе. В таком масштабе зависимость напряженности поля от расстояния имеет вид прямой. Наклон прямых тем круче, чем короче волна, с укорочением волны резче убывает напряженность поля за горизонтом.

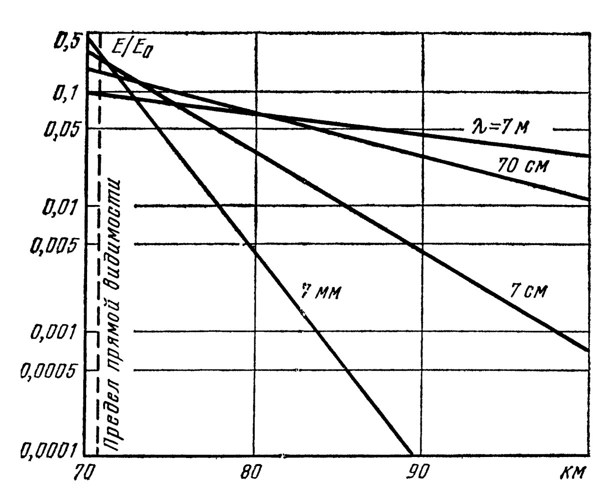


Рис. 42. Дифракционное поле за пределами видимого горизонта.

Следует отметить, что в зоне дифракции, где напряженность поля меньше, чем в зоне прямой видимости, влияние тропосферной рефракции сказывается сильнее. Изменения напряженности поля под влиянием тропосферной рефракции невелики по сравнению с напряженностью поля в пределах прямой видимости и значительны по сравнению со слабым дифракционным полем.

Для того чтобы при вычислении напряженности поля за пределами прямой видимости учесть влияние рефракции, в дифракционные формулы вместо действительного радиуса земного шара подставляют значение эквивалентного радиуса, который зависит от состояния тропосферы. Это положение проверялось опытным путем. В 1954 г. в ФРГ проводились специальные наблюдения по распространению УКВ в области тени. Наблюдения велись на трассе длиной 76 км. Для опытов использовались амплитудно-модулированный передатчик мощностью 180 Вт, работавший на частоте 68 МГц, и приемник чувствительностью 10 мкВ. Передающая антенна помещалась на высоте 90 м, а приемная — на высоте 30 м.

Одновременно с измерением напряженности поля примерно в середине трассы запускали метеорологические радиозонды (приборы, поднимающиеся на небольших воздушных шарах и автоматически специальным кодом сообщающие по радио сведения о состоянии атмосферы: давлении, влажности и температуре). По сведениям, получаемым от радиозондов, подсчитывали коэффициент преломления тропосферы и эквивалентный радиус Земли. Полученную по расчету напряженность поля сравнивали с измеренным значением и таким образом проверяли применимость для расчетов дифракционной формулы.

Такие измерения проводились в течение 4 лет. При этом первые 2 года наблюдений не дали определенных результатов: получались то хорошие совпадения, то очень плохие. Причина этого заключалась в том, что трасса первоначально была выбрана так, что она проходила в 90 км от метеорологической станции, с которой запускались радиозонды. В следующие 2 года изменили трассу и проложили ее так, что метеорологическая станция находилась в средней части пути. Тогда стали получаться хорошие совпадения расчетов с измерениями.

Характер изменения напряженности поля в зависимости от расстояния и от времени года и суток исследовался вблизи Харькова. Измерялась напряженность поля на частоте 83,75 МГц звукового сопровождения Харьковского телецентра на нескольких направлениях на расстояниях 90—120 км от него. Анализ результатов этих измерений показал, что в месте приема присутствует и более устойчивая составляющая напряженности поля, обусловленная дифракцией и нормальной рефракцией, и составляющая поля, быстро меняющаяся во времени, — рассеянный сигнал. Уровень напряженности поля в этих опытах менялся мало в течение года.

Все опыты показали, что за пределами видимого горизонта в зоне дифракции напряженность поля сильно зависит от состояния тропосферы.

Интересные явления наблюдаются при распространении радиоволн в горных районах. Исследования советских ученых А. И. Калинина, В. Н. Троицкого, Ч. И. Цыдыпова и др. показали, что напряженность поля за горой в некоторых случаях не убывает, а возрастает с увеличением расстояния. Вершина горы действует подобно приемно-передающей антенне. Поле в точке приема является суммой четырех волн, распространяющихся по путям *АБВ*, *АГБВ*, *АБДВ* и *АГБДВ* (рис. 43), амплитуды и фазы которых зависят от геометрии трассы и коэффициента отражения от поверхности земли.

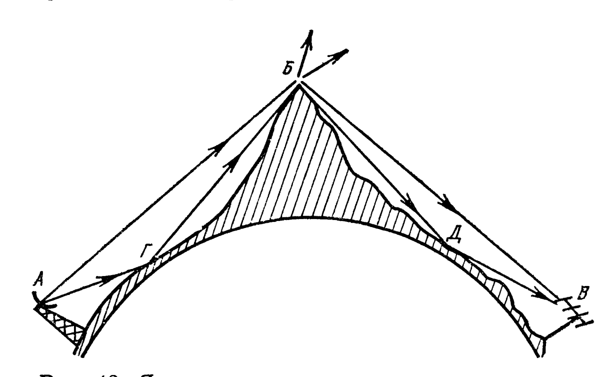


Рис. 43. Явление «усиления» препятствием.

Увеличение напряженности поля отчетливо наблюдалось при проведении опытов по сооружению ретрансляционных телевизионных станций в Бурятской АССР. Сооружение ретрансляционных телевизионных станций на горных вершинах представляет большие сложности как при их постройке, так и при обслуживании. Поэтому исследовалась возможность установления ретрансляторов в долинах. Измерялись напряженности поля Улан-Удэнского, Иркутского и Читинского телецентров, работающих на частотах 49,75 и 77,25 МГц на 45 направлениях. Приемная аппаратура была смонтирована на автомобиле. Исследовались

радиотрассы протяженностью до 250 км, проходящие над равниной, над одной горной вершиной или несколькими вершинами, причем высота гор превосходила 1000 м над уровнем долин. Оказалось, что на трассах, проходящих над одной вершиной на некотором расстоянии за горой, поле на 20 и даже 60 дБ превышало поле на том же расстоянии над равниной. На трассах, проходящих над несколькими вершинами, увеличение поля не обнаруживалось или проявлялось слабо. Проведенные исследования позволили выбрать место для размещения ретрансляционных телевизионных станций в долинах, в области геометрической тени за горой, где они надежно работают. Дальнейшие исследования велись в направлении искусственного «обострения» горных вершин. Для этого на вершине горы устанавливалась металлическая сетка, действующая как пассивный ретранслятор. Пример результатов измерений на частоте 1500 МГц приведен на рис. 44, где изображен профиль радиотрассы, а на графике отложено отношение напряженности поля при установке, «обостряющей» вершину сетки $E_{\text{сет}}$, к напряженности поля без сетки E, выраженное в децибелах, в зависимости от ширины сетки. Высота сетки составляла 1,5 м.

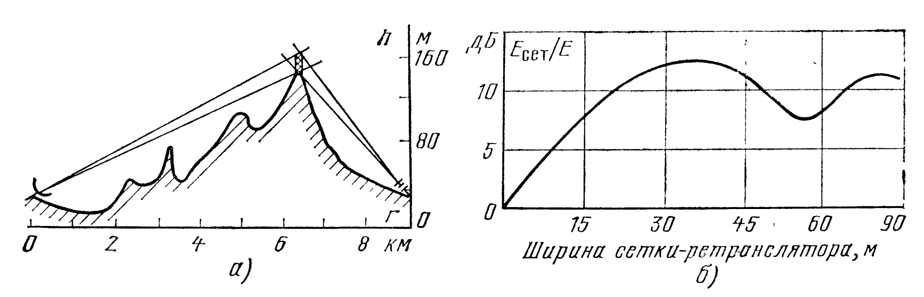


Рис. 44. Увеличение напряженности поля за горой при искусственном «обострении» вершины.
а — профиль радиотрассы; *б* — зависимость напряженности поля от ширины искусственного ретранслятора.

Измерения показали, что установка такого несложного сооружения позволяет увеличить напряженность за горой еще на 10—15 дБ.

Такие ретрансляторы применяются на протяженных УКВ радиолиниях и над равнинной местностью, поскольку сооружение оказывается дешевле, чем увеличение высоты мачты для подъема антенны.

ПОГЛОЩЕНИЕ УКВ В ТРОПОСФЕРЕ

При распространении радиоволн в тропосфере ослабление напряженности поля испытывают только радиоволны дециметрового и более коротковолновых диапазонов. Ослабление напряженности поля радиоволн связано с частичным преобразованием электромагнитной энергии в другие виды энергии и с рассеянием; это ослабление проявляется в уменьшении уровня напряженности поля проходящей волны.

Основной причиной поглощения радиоволн в тропосфере является наличие капель воды, присутствующих здесь в виде тумана или дождя. При рассмотрении процесса поглощения различают два явления: поглощение радиоволн капельками воды и рассеяние их в скоплении капель воды.

Поглощение радиоволн капельками воды происходит благодаря тому, что при прохождении радиоволн в каждой капельке наводятся токи поляризации, которые вызывают тепловые потери, увеличивающиеся с повышением частоты.

Рассеяние радиоволн капельками воды также приводит к ослаблению поля проходящей волны. Физика процесса заключается в том, что токи, наведенные радиоволной в капельках, излучают, причем каждая капелька излучает равномерно во все стороны. Это приводит к рассеянию энергии радиоволны, поскольку не вся энергия движется в первоначальном направлении: часть ее оказывает-

ся направленной в сторону или в обратном направлении. Рассеяние радиоволн характеризуется коэффициентом рассеяния, который определяется как отношение энергии, рассеянной единицей объема, заполненного каплями, к энергии проходящей волны. Коэффициент рассеяния тем больше, чем крупнее капля и чем короче длина волны.

Суммарный коэффициент поглощения с учетом тепловых потерь и рассеяния определяют расчетным путем и проверяют экспериментально.

Расчетная зависимость коэффициента поглощения радиоволн в децибелах от длины волны для прохождения радиоволн в области дождя и тумана различной интенсивности представлена на рис. 45, *а*. Из графика видно, что поглощение резко уменьшается с увеличением длины волны и становится ничтожно малым для волн длиннее 10 см

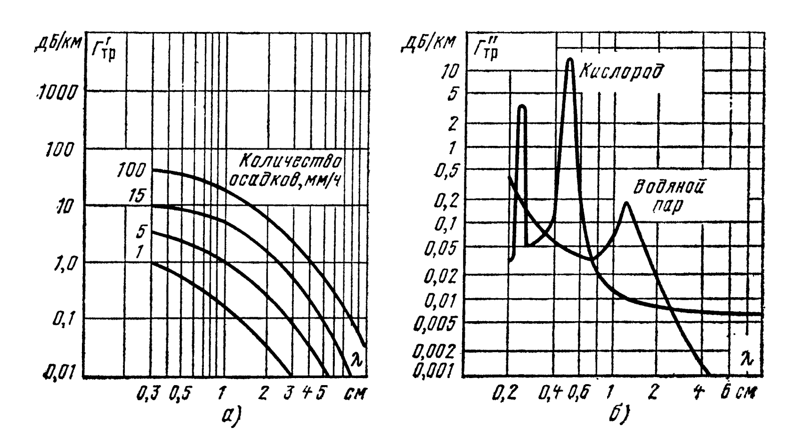


Рис. 45. Поглощение УКВ в атмосфере.
а — поглощение в дожде и тумане; *б* — поглощение в парах воды и кислороде.

Сантиметровые радиоволны рассеиваются капельками дождя и тумана, что приводит к появлению отраженных радиолокационных сигналов. Наличие отражений от дождя и туч, занимающих большую площадь на экранах радиолокационных станций, часто мешает нормальной работе этих станций.

Кроме рассмотренных видов поглощения, миллиметровые волны испытывают добавочное поглощение в молекулах водяного пара и кислорода. Это поглощение связано с тем, что молекулы H_2O обладают постоянными электрическими моментами, а молекулы O_2 — магнитными моментами. Электромагнитное поле проходящей волны приводит в колебание молекулы, причем когда частота волны совпадает с собственной частотой молекул, возникают резонансные явления и энергия волны переходит во внутримолекулярную энергию. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны в сухом воздухе представлена на рис. 45, *б*. Видно, что интенсивное поглощение происходит на волнах 0,18, 0,25, 0,5 и 1,35 см.

ДАЛЬНЕЕ ТРОПОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ

ТРОПОСФЕРНЫЙ ВОЛНОВОД

Под влиянием тропосферы УКВ могут распространяться и на большие расстояния — вплоть до 1000 км, однако такое распространение происходит либо нерегулярно, либо для работы радиолиний требуется специальная сложная аппаратура.

Основными факторами, способствующими дальнему распространению УКВ в тропосфере, являются повышенная рефракция радиоволн, отражение от слоистых неоднородностей тропосферы и рассеяние турбулентными неоднородностями тропосферы. Большей частью эти факторы действуют одновременно, и трудно разделить их влияние.

Иногда в тропосфере создаются такие условия, что коэффициент преломления изменяется с высотой необычно. Например, после захода солнца поверхность Земли быстро охлаждается; охлаждаются и нижние слои воздуха, верхние же слои еще остаются нагретыми. Значит, температура воздуха в этом случае не убывает, а возрастает с высотой и коэффициент преломления убывает с увеличением высоты более резко, чем при нормальной рефракции.

Резкое убывание коэффициента преломления тропосферы с высотой наблюдается часто над водной поверхностью: вблизи воды влажность воздуха велика и резко убывает с изменением высоты. Возможно и обратное явление: ветер принес холодный воздух с моря, вблизи же Земли воздух остался теплым. Тогда температура убывает с высотой быстрее, чем обычно, а коэффициент преломления убывает с высотой медленнее, чем обычно, или может даже возрастать.

На рис. 46 схематически показано, как при различных видах изменений коэффициента преломления с высотой меняется кривизна траектории волны.

На рис. 46, *а* показана нормальная тропосферная рефракция. Коэффициент преломления меняется при этом на $4 \cdot 10^{-5}$ при подъеме на каждые 100 м. Траектория радиоволны представляет собой дугу окружности радиусом

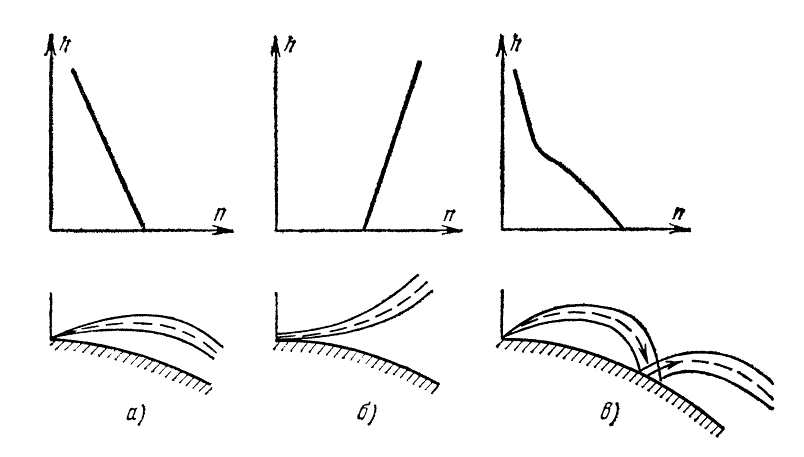


Рис. 46. Различные случаи атмосферной рефракции.
а — нормальная; *б* — отрицательная; *в* — сверхрефракция.

25 000 км, обращенную выпуклостью вверх. На рис. 46, *б* показана отрицательная тропосферная рефракция, когда коэффициент преломления возрастает с высотой. Траектория луча обращена выпуклостью вниз, и волна удаляется от земной поверхности быстрее, чем при нормальной рефракции. Это приводит к уменьшению напряженности поля на данном расстоянии и к уменьшению дальности распространения УКВ. Если при нормальной рефракции был возможен прием радиоволн где-то на границе прямой видимости, то при появлении отрицательной рефракции прием в данном месте станет невозможным.

На рис. 46, *в* представлена положительная тропосферная рефракция, когда коэффициент преломления убывает с высотой быстрее, чем при нормальной рефракции. Траектория волны обращена при этом выпуклостью вверх и имеет меньший радиус кривизны. Если показатель преломления изменяется с высотой больше чем на $16 \cdot 10^{-6}$ на каждые 100 м, то траектория луча станет настолько изогнутой, что волна получит возможность вернуться на земную поверхность, такое явление называется *сверхрефракцией*. В случае положительной рефракции

напряженность поля на данном расстоянии от передатчика увеличивается и увеличивается дальность распространения радиоволн.

Положительная рефракция и сверхрефракция радиоволн наблюдаются обычно в антициклонную погоду при вечернем охлаждении почвы и наиболее часто в теплое время года.

Рефракционные свойства тропосферы меняются сравнительно медленно, поэтому поле, обусловленное повышенной рефракцией, оказывается достаточно устойчивым, без глубоких замираний.

Когда область сверхрефракции простирается на значительные расстояния над земной поверхностью, то в этом районе УКВ могут быть приняты на весьма больших расстояниях от передатчика. Распространение УКВ в этом случае происходит следующим образом: вернувшийся на Землю луч отражается от земной поверхности, затем рефрагирует в тропосфере и снова возвращается на Землю, радиоволна распространяется путем последовательного отражения от тропосферы и поверхности Земли. Это явление напоминает распространение радиоволн в металлическом волноводе и поэтому получило название *тропосферного волновода*. В отличие от металлического волновода стенки тропосферного волновода полупрозрачны. Только часть энергии волны отражается в тропосфере, а часть, преломляясь, проходит через нее и не возвращается на Землю.

При одних и тех же условиях рефракции более короткие волны лучше отражаются и меньше просачиваются сквозь «стенки» тропосферного волновода. Для тропосферного волновода определенной высоты $h_в$ по аналогии с металлическим имеется некоторая критическая длина волны $\lambda_{кр}$. Волны длиннее критической быстро затухают и не распространяются в волноводе:

$$\lambda_{кр} = 0{,}085\, h_в^{3/2}, \qquad (24)$$

где $\lambda_{кр}$, см; $h_в$, м.

Поэтому распространение радиоволн в условиях тропосферного волновода наблюдается чаще всего на дециметровых и сантиметровых волнах и реже на метровых.

Размеры тропосферного волновода должны во много раз превосходить длину волны. Так, для сантиметровых волн необходим волновод высотой 30—35 м.

Рис. 47 иллюстрирует распространение УКВ в условиях тропосферного волновода; рис. 47, *а* соответствует случаю так называемого *приземного волновода*, когда непосредственно у поверхности земли создались условия сверхрефракции и только на некоторой высоте рефракция становится нормальной. Уровень, до которого продолжается сверхрефракция, является высотой волновода.

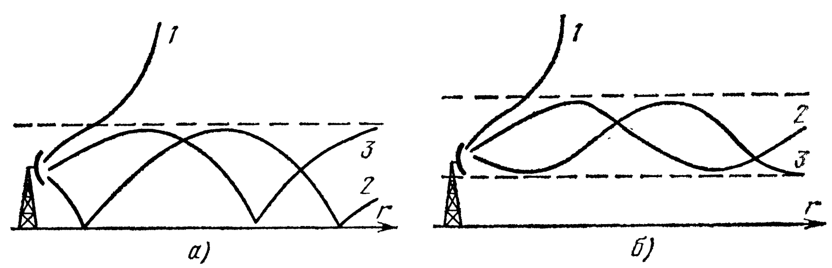


Рис. 47. Распространение УКВ в условиях атмосферного волновода.
а — приземный волновод; *б* — поднятый волновод.

Рис. 47, *б* соответствует случаю *приподнятого волновода*, когда рефракция у поверхности земли до некоторой высоты нормальна, затем на некотором участке возникает сверхрефракция (это и есть волновод) и затем рефракция снова нормальна. Роль верхней и нижней стенок волновода играет тропосфера. Волна распространяется в волноводе, отражаясь от верхней и нижней воздушных стенок волновода.

В условиях волноводного канала отражения волн от его стенок имеют место только при пологих траекториях их распространения (*2* и *3* на рис. 47, *а*, *б*), а при более крутых (*1*) волны просачиваются сквозь стенки.

Теоретически возможность распространения УКВ в условиях волноводного канала была установлена советским ученым П. Е. Краснушкиным в 1943 г. Дальнейшее развитие теория тропосферного волновода получила в работах В. А. Фока.

Влияние волноводного канала на распространение УКВ неоднократно тщательно исследовалось. С этой целью проводились наблюдения за напряженностью поля УКВ на трассах протяженностью 200—300 км. Одновременно тщательно исследовались метеорологические условия на разных высотах над поверхностью Земли (при помощи приборов, установленных на воздушных шарах или самолетах). Причем если метеорологические измерения ведутся в средней части пути, то результаты метеорологических измерений точно совпадают во времени с изменением напряженности поля. На основании метеорологических данных можно делать прогнозы распространения УКВ. Исследование влияния атмосферных условий на распространение УКВ по изменению условий распространения позволяет судить об изменениях в атмосфере и использовать это для прогнозирования погоды.

Во всех ли случаях появление тропосферного волновода улучшает условия работы УКВ радиолинии? Оказывается, бывают случаи, когда при появлении атмосферного волновода работа радиолинии полностью нарушается. Так, например, когда на побережье Австралии впервые установили радиолокационные установки, то обнаружилось, что часто сильно увеличивалась дальность «видимости» станций для объектов, находящихся на морской поверхности, и в то же время станции, следящие за самолетами, переставали обнаруживать их при сравнительно небольших расстояниях. Для исследования причин сокращения видимости радиолокационных установок, следящих за самолетами, были проведены специальные наблюдения. Самолет совершал полет в сторону моря на расстояние до 200 км, то поднимаясь до 1000 м над уровнем моря, то снижаясь до бреющего полета. В это время работала береговая радиолокационная станция на частоте 200 МГц и велись метеорологические наблюдения, позволившие определить изменение коэффициента преломления тропосферы с высотой.

На рис. 48 сплошной линией нанесена трасса полета самолета. На тех участках трассы, где самолет отмечался станцией, показаны штрихи, пропорциональные интенсивности принятого сигнала. Пунктирными линиями отмечены границы волновода, построенные на основании метеорологических измерений.

Из рис. 48 следует, что в области ниже и внутри тропосферного волновода самолет обнаруживался на расстояниях свыше 150 км. Когда же самолет поднимался выше тропосферного волновода, то станция не могла его обнаружить

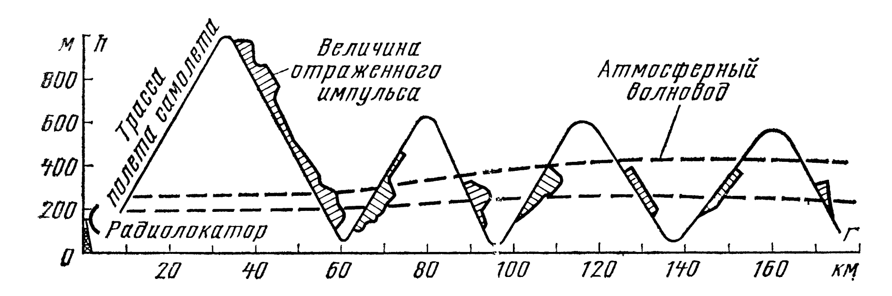


Рис. 48. Работа радиолокационной станции в условиях атмосферного волновода.

даже на небольшом расстоянии. Исключение составляет первый участок пути, где самолет находился в области проникновения волн, излученных антенной радиолокационной станции.

Таким образом, в присутствии тропосферного волновода дальность действия самолетной радиолокационной станции может сократиться. Бороться с этим можно либо путем увеличения излучаемой мощности, либо путем понижения рабочей частоты. При удлинении волны большая часть энергии просачивается

сквозь стенки волноводного канала и, следовательно, он оказывает меньшее влияние.

Интересный материал для изучения влияния атмосферных волноводов на распространение радиоволн дают радиолюбители. Дальние любительские радиосвязи наблюдались в ясную антициклонную погоду. Возможность дальних связей отмечалась иногда в течение 2—3 дней подряд. На волнах сантиметрового диапазона наблюдались связи на расстоянии до 1000 км. На волнах длиной 5—10 м волноводное распространение наблюдается редко.

Когда возможен сверхдальний тропосферный прием? Большинство наблюдений показано, что чаще всего такой прием имеет место во время антициклона, главным образом летом во второй половине дня или вечером. Но некоторые наблюдатели отмечали появление атмосферных волноводов зимой или в утренние часы. По-видимому, на различных трассах в разных климатических условиях благоприятные условия для образования атмосферных волноводов могут появляться в разное время.

Просматривая журнал «Радио», где под заголовком «Тропо» регулярно сообщаются сведения о дальних тропосферных связях радиолюбителей, можно проследить такие закономерности. Наиболее часто дальнее тропосферное распространение наблюдается в западных областях страны — Белоруссии, Смоленской, Брянской областях. Но это же явление имеет место в Тульской, Рязанской, Костромской и ряде других областей.

Осенью 1976 г. ярко выраженное тропосферное распространение наблюдалось 19—22 октября в Минской области. В эти же дни радиолюбители Смоленска устанавливали дальние радиосвязи на расстояния до 300—900 км. В августе 1979 г. отмечались частые случаи дальнего тропосферного распространения в западных областях Советского Союза. В это время в Смоленской области работала команда спортсменов ультракоротковолновиков из Москвы, которым удалось установить на волнах частотой 144 и 430 МГц дальние радиосвязи с Ленинградом, Украиной и другими областями в радиусе 600—730 км.

Радиолюбители заметили, что для тропосферного распространения характерна лучшая слышимость при меньших расстояниях. На частоте 430 МГц слышимость бывает лучше, чем на частоте 144 МГц. Это объясняется тем, что, как отмечалось ранее, для распространения более коротких волн условия сверхрефракции должны выполняться на меньшем интервале высот, что наблюдается чаще. Пользуясь формулой (24), можно подсчитать, что для волн частотой 144 МГц высота волновода должна быть не менее 400 м, а для волн частотой 430 МГц — может не превосходить 100 м. Переход к еще более высоким частотам увеличит число случаев дальнего тропосферного распространения УКВ. Радиолюбители ФРГ, Англии, США, работающие на частотах 1215 МГц, 10 ГГц, отмечают частые случаи дальних тропосферных связей на расстоянии до 500, а иногда и до 1000 км.

Понятно, что при разнообразных климатических условиях нашей обширной страны в разных районах различно и время появления условий, благоприятных для сверхдальнего распространения. Только радиолюбители могут помочь широкому изучению этого интересного явления.

РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН НА НЕОДНОРОДНОСТЯХ ТРОПОСФЕРЫ

Дифракция и нормальная атмосферная рефракция могут объяснить возможность регулярного приема УКВ на расстояниях, незначительно превышающих пределы прямой видимости. Но в последнее время было обнаружено, что при применении остронаправленных антенн и передатчика достаточной мощности можно осуществить регулярную работу УКВ радиолиний протяженностью 300—800 км. Такая возможность обусловлена рассеянием (переизлучением) радиоволн на неоднородностях тропосферы.

Процесс рассеяния радиоволн можно представить себе следующим образом. Тропосфера неоднородна по своему строению, она представляет собой совокупность неустойчивых воздушных объемов — неоднородностей, в которых коэффициент преломления воздуха отличается на некоторую небольшую величину от среднего значения. Эти неоднородности непрерывно флуктуируют, т. е. их плотность, форма и размеры непрерывно меняются. Радиоволна, падающая

на эти неоднородности, наводит в каждой из них токи, которые, в свою очередь, излучают примерно как антенны. Таким образом, неоднородности играют роль своеобразных ретрансляторов.

Основную роль в рассеянии радиоволн играют неоднородности, размеры которых составляют 50—60 м и во много раз превышают длину волны. При рассеянии радиоволн на каплях воды размеры неоднородностей много меньше длины волны и рассеиваемые волны распространяются равномерно во все стороны. При условиях, имеющих место в тропосфере, рассеяние происходит в пределах угла, составляющего несколько градусов с направлением падающей волны. Поэтому основная часть энергии волны проходит сквозь рассеивающую область и не может быть использована для приема. Только небольшая часть энергии возвращается на Землю, где она может быть принята.

На рис. 49 показана схема работы линии радиосвязи при использовании тропосферного рассеяния. Передающая антенна облучает некоторый участок тропосферы, называемый *рассеивающим объемом.* Приемная антенна как бы «собирает» рассеянные волны. Таким образом, на приемную антенну приходят волны не от точечного источника, каким можно считать передающую антенну, а от источника, распределенного по значительному объему пространства.

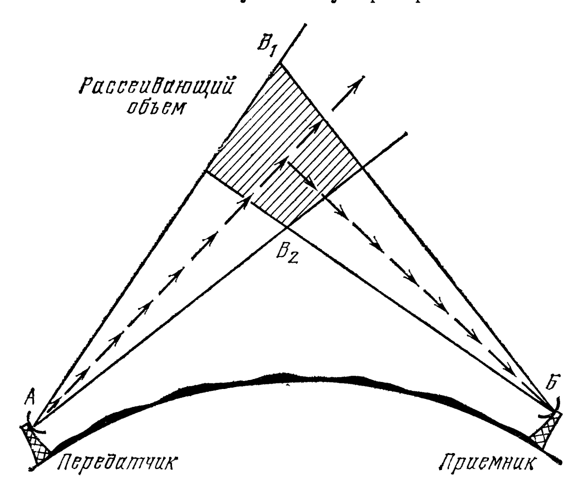


Рис. 49. Схема радиолинии с использованием рассеяния УКВ в тропосфере.

Напряженность поля рассеянного сигнала подвержена замираниям, получающимся в результате сложения колебаний, приходящих от разных участков рассеивающего объема. Частота замираний увеличивается с увеличением скорости ветра и укорочением волны. Чем больше скорость ветра, тем быстрее и существеннее изменения в структуре тропосферы, а чем короче длина волны, тем при меньших изменениях в тропосфере изменяется фаза радиоволны. Моменты замираний не совпадают в различных точках пространства. Это позволяет применять для борьбы с замиранием прием на разнесенные антенны. Антенны разносят на расстояние 25—100λ и используют наибольший из двух сигналов.

Рассеяние УКВ в тропосфере вызывает некоторые ограничения в передаваемой ширине полосы частот, связанные с возможностью нескольких путей прохождения радиоволн. Наиболее короткий путь проходит по нижней части рассеивающего объема, а наиболее длинный — по его верхней части. Поэтому один сигнал запаздывает по отношению к другому, что вызывает удлинение передаваемого импульса, а это эквивалентно сужению полосы частот. Ширина полосы частот Δf может быть ориентировочно определена из соотношения

$$\Delta f = c/\Delta r, \tag{25}$$

где c — скорость света; Δr — разность в длинах путей, проходимых различными волнами в пределах ширины диаграммы направленности.

Из рис. 49 видно, что $\Delta r = AB_1Б - AB_2Б$. Чем шире диаграммы направленности антенн, тем больше Δr, а следовательно, тем меньшую полосу частот

можно передать без искажения. Стремление передать более широкую полосу частот приводит к необходимости применения остронаправленных антенн с шириной диаграммы направленности в один или несколько градусов. Практически оказывается возможным передать полосу частот до 1—2 МГц.

Многолетняя экспериментальная работа по исследованию полей радиоволн, рассеянных неоднородностями тропосферы, и изучению работы радиолиний тропосферного рассеяния проводилась под руководством Б. А. Введенского и М. А. Колосова. В результате этой работы ими был предложен метод расчета таких радиолиний.

Ослабление мощности волны при распространении, выраженное в децибелах, определяют по формуле

$$B = 10 \lg (P_{пр}/P_{пр\,0}), \qquad (26)$$

где $P_{пр}$ — мощность, получаемая на входе приемного устройства при тропосферном распространении, а $P_{пр\,0}$ — при распространении на то же расстояние в свободном пространстве (рассчитывается по формуле (3)).

Величина B складывается из следующих величин:

$$B = B_c + \Delta B_м + \Delta B_р + \Delta B,$$

где B_c — ослабление для заданного расстояния и длины волны при среднем состоянии тропосферы и гладкой ее поверхности; $\Delta B_м$ — поправка на метеорологические условия; $\Delta B_р$ — поправка на рельеф местности; ΔB — поправка, учитывающая замирания. Для определения всех этих коэффициентов существуют графики. На рис. 50 приведен только график зависимости B_c от расстояния для волн длиной от 3 до 150 см, которые применяются на этих радиолиниях. Видно, что чем короче длина волны, тем меньше мощность принятого сигнала, причем разница растет с увеличением протяженности радиотрассы. На расстоянии 700 км мощность (или напряженность поля) рассеянного сигнала на 90—150 дБ ниже, чем была бы в свободном пространстве.

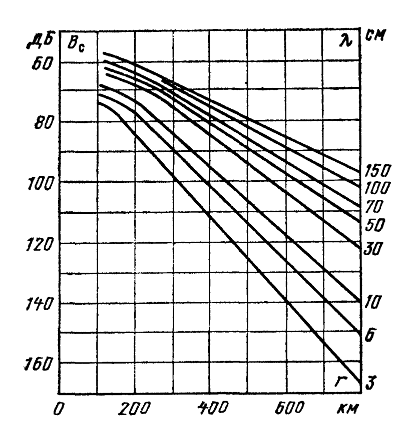


Рис. 50. Ослабление напряженности поля (или мощности) при тропосферном рассеянии радиоволн.

Быстрое убывание напряженности поля и сильные замирания предъявляют высокие требования к аппаратуре. Приходится применять передатчики значительной мощности (более 10 кВт) и остронаправленные антенны. Сконструировать остронаправленные антенны легче для более коротких волн. Чем короче волна, тем меньше могут быть размеры антенны для создания диаграммы направленности определенной ширины. Поэтому для передачи путем рассеяния применяются дециметровые и сантиметровые волны.

Параболическая антенна, использующаяся на одной линии связи рассматриваемого типа, имеет коэффициент усиления, равный 10 000. Антенна состоит из облучателя и параболического отражателя. Отражатель, диаметр которого равен 18 м, сконструирован из алюминиевых трубок. Такая антенна представляет собой сложное сооружение массой более 1 т. Она должна быть очень прочной, чтобы выдержать напор ветра.

Явление тропосферного рассеяния с успехом используется для создания ретрансляционных линий. Несмотря на то, что при этом требуются мощные передатчики, сложные антенны и чувствительные приемные устройства, создание таких линий оказалось экономически выгодным. Этот способ передачи позволил размещать промежуточные станции на расстоянии не 50—70 км, как обычно, а 200—800 км и, следовательно, сократить число необходимых ретрансляционных станций, что особенно важно в малонаселенных районах и на море. Линии, использующие тропосферное рассеяние, применяются главным образом для много-

канальной радиосвязи. Они работают очень надежно, не подвержены каким-либо нарушениям радиосвязи. Понятно, что сложность аппаратуры не позволяет использовать этот вид распространения радиоволн для радиолюбительской радиосвязи.

ИОНОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ МЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН

ОТРАЖЕНИЕ ОТ РЕГУЛЯРНОГО СЛОЯ F_2

Возможность сверхдальнего распространения метровых волн обусловливают следующие явления, происходящие в иносфере: 1) повышение электронной концентрации слоя F_2 в годы максимума солнечной деятельности; 2) появление спорадического слоя E_c и 3) рассеяние радиоволн на неоднородностях ионосферы. Каждый из указанных видов распространения имеет свои характерные особенности.

На рис. 51 изображена схема всех трех случаев ионосферного распространения метровых волн.

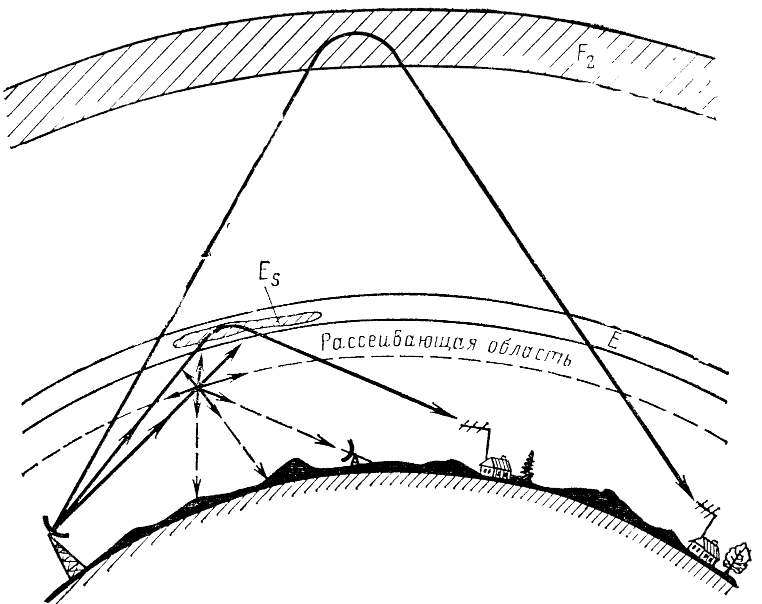


Рис. 51. Схема ионосферного распространения УКВ.

Путем отражения от ионосферы на высоте слоя F_2 распространяются КВ. Для волн короче 10 м слой F_2 является большей частью прозрачным. Однако в годы максимума солнечной деятельности электронная плотность слоя F_2 достигает в дневное время зимой таких высоких значений, что часто оказывается возможной радиосвязь на волнах длиной 10—6 м.

Зона молчания составляет при этом не менее 2000 км. Предельное расстояние, которое может быть перекрыто путем одного отражения от ионосферы, достигает 3500—4000 км. Кроме того, возможно распространение путем двух последовательных отражений от слоя F_2 и от поверхности земли, что удваивает возможные расстояния дальности передачи. Таким образом, при отражении от слоя F_2 метровые волны могут распространяться на расстояние от передатчика примерно 2000—10 000 км.

Максимумы солнечной деятельности наблюдались в 1937—1938, 1947—1948, 1957—1959, 1967—1969, 1978—1980 гг.

Зимой 1937 и 1938 гг. радиолюбители Ленинграда, работавшие в диапазоне волн 10 м, поддерживали радиосвязь с радиолюбителями Западной Сибири, Англии, Франции, Египта, Австралии, США и ряда других стран. Радиосвязь в этом диапазоне оказывалась возможной с октября по апрель в дневные часы с 10—11 до 18—19 ч. При этом утром связь налаживалась с восточными корреспондентами, а вечером — с западными.

В зимние месяцы 1947—1949 гг. наблюдалось много случаев радиосвязи радиолюбителей Англии и США, работавших на волнах длиной около 6 м. Американские станции, работавшие на волне 7 м, были ежедневно слышны в Англии, а телевизионные передачи из Англии принимались на юге Африки.

В зимние дни 1957—1959 гг. на волнах длиной 7—8 м удавалось установить большое количество неожиданных дальних связей.

На рис. 52 показано, как изменились максимальные частоты, которые могли отражаться от слоя F_2 в течение суток в декабре 1956 г. На кривых указаны расстояния, на которые можно вести передачу. Эти кривые построены для линий радиосвязи, у которых средняя часть пути лежит на широтах 45—35° с. ш. Из кривых видно, что прием радиоволн частотой выше 30 МГц на этих направлениях мог осуществляться с 8 до 16 ч, причем протяженность линии связи могла превышать 2000 км.

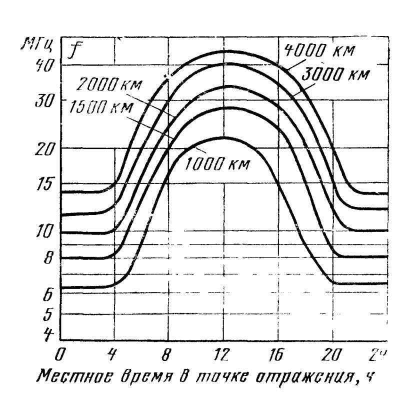


Рис. 52. Максимальные частоты для радиотрасс протяженностью 1000—4000 км в год максимума солнечной деятельности.

На радиолиниях, проходящих севернее, время возможной работы на УКВ сокращается и радиосвязь становится возможной не каждый день. Это отмечалось, например, московским радиолюбителем С. К. Сотниковым, который в некоторые дни декабря 1956 г. в 14—15 ч по московскому времени принимал передачи телевидения из Лондона на волне частотой 45 МГц и еще чаще звуковое сопровождение телевизионных передач из Лондона и Парижа на волне частотой около 41 МГц. В этом же месяце, но в предполуденные часы в Москве был возможен прием сигналов радиолюбителей, работающих в диапазоне 38—40 МГц, из Томска, Новосибирска, Барнаула, Ташкента, Самарканда.

Зимой 1968 г радиолюбители Мурманска устанавливали радиосвязь с радиолюбителями Якутска, Кызыла, Иркутска, Душанбе и даже Владивостока. Такие сверхдальние связи осуществлялись благодаря отражению радиоволн от слоя F_2.

К сожалению, во время последнего очень интенсивного максимума солнечной деятельности 1978—1980 гг. радиолюбители перешли на работу в диапазоны более высоких частот — 144 МГц и выше. Радиоволны этих диапазонов не отражаются от слоя F_2, и поэтому не было сообщений об установлении радиолюбительских связей на расстояния более 2500 км. В ближайшие годы число пятен на Солнце начнет уменьшаться и электронная плотность слоя F_2 не будет такой большой. Уменьшится и возможность дальних связей до появления нового максимума солнечной деятельности.

ОТРАЖЕНИЕ ОТ СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ E_c

Появляющийся в ионосфере спорадический слой E_c имеет временами электронную плотность, достаточную для отражения волн метрового диапазона. С увеличением числа и мощности телевизионных станций прием телепередач на

больших расстояниях при отражении радиоволн от слоя E_c стал нередким явлением. Радиолюбительские связи в диапазоне МВ также часто осуществляются этим путем.

Спорадический слой появляется нерегулярно, поэтому и этот вид сверхдальнего распространения УКВ не может быть регулярным. Частота случаев сверхдальнего распространения зависит от частоты появления слоя E_c, который наблюдается чаще всего летом в дневное время и очень редко зимой (см. рис. 18). От года к году частота случаев сверхдальней радиосвязи меняется, но нерегулярно. Прямой связи между 11-летним циклом солнечной активности и таким видом распространения установить не удалось. Чаще всего такое распространение наблюдается в более южных широтах.

Высота, на которой образуется слой E_c (100—120 км), определяет максимальное расстояние передачи в 2000—2500 км. Плотность ионизации слоя определяет максимальные рабочие частоты и протяженность зоны молчания. Зона молчания для метровых волн составляет не менее 1000 км. Чем короче волна, тем больше протяженность зоны молчания. Следовательно, прием МВ возможен на расстоянии примерно 1000—2500 км.

На широтах Москвы—Киева сравнительно часто возможен сверхдальний прием на частотах до 70—75 МГц, а на широтах Алма-Аты—Ашхабада — на частотах до 90—95 МГц. Чем короче волна, тем реже возможен прием. Прием возможен в то время, когда спорадический слой находится в средней части пути между передатчиком и приемником. Спорадический слой появляется над небольшой территорией, поэтому обычно одновременно возможен прием только одной станции. Благодаря движению слоя через некоторое время оказывается возможным прием другой станции или первой станции в новом пункте. Продолжительность приема бывает различной: от нескольких минут до нескольких часов.

Не удается указать точно время появления слоя E_c и предсказать время появления приема и его продолжительность. Характерной особенностью при отражении от спорадического слоя E_c является его полупрозрачность. Не вся энергия волны, падающей на слой, отражается от него; часть энергии проходит сквозь слой и теряется для приема, и только небольшая часть (иногда 0,1) отражается. При этом чем выше частота, тем меньшая часть энергии отражается. Поэтому наиболее часто возможен прием передач мощных станций (мощностью не менее 3—5 кВт).

В летние месяцы на границе прямой видимости Московского телецентра наблюдается прием телевизионных передач из Праги (расстояние — около 1800 км). Напряженность поля пражской станции оказывается временами настолько значительной, что передачи московской станции совершенно вытесняются. Временами удаленная станция создает только сильные помехи, проявляющиеся в виде «муара» на экране и треска в громкоговорителе. В пределах Москвы, как и в непосредственной близости от других мощных телецентров, где напряженность поля, создаваемая местным передатчиком, велика, сверхдальнего приема не наблюдается. Прием передач из Москвы наблюдается в различных странах Западной Европы. На Украине возможен прием из Италии, Дании, Швейцарии. В Прибалтике временами смотрят передачи из Парижа и Лондона. На рис. 53 показаны фотографии телевизионных изображений, принятых на Украине.

У нас и за границей многие радиолюбители совершенствуют свою аппаратуру для сверхдальнего приема телевидения. Для этого повышают чувствительность приемника и применяют направленные антенны. Хорошие результаты получаются при использовании двухъярусной пятиэлементной антенны, имеющей коэффициент усиления 10—12 (рис. 54). В том случае, когда предусмотрена возможность поворота антенны, удается следить за движением спорадического слоя и по мере его перемещения принимать передачи нескольких станций. Например, если спорадический слой появился где-то в районе Карпат над Румынией, то на Украине возможен прием передач из Рима. Если слой E_c начнет перемещаться к северу, то тот же наблюдатель может увидеть последовательно передачи из Вены и Праги. Если слой E_c продвинется на северо-запад, наблюдатель увидит передачи из Швейцарии и Западной Германии. На карте на рис. 55 показано перемещение слоя E_c, при котором оказался возможным прием различных станций на Украине.

Рис. 53. Фотографии телевизионных изображений, принятых на Украине из Швейцарии (*а*) и из Италии (*б*).

Отражение радиоволн от слоя E_c создает возможность для установления сверхдальних связей на УКВ. В этом случае применяются направленные приемные и передающие антенны, что позволяет наладить связь при мощности передатчика в несколько десятков ватт.

Радиолюбителям из Горького, работающим в 7-метровом диапазоне, удавалось в летние месяцы устанавливать связь с радиолюбителями Ростова-на-Дону, Свердловска, Барнаула. Радиолюбители Ростова-на-Дону в это же время

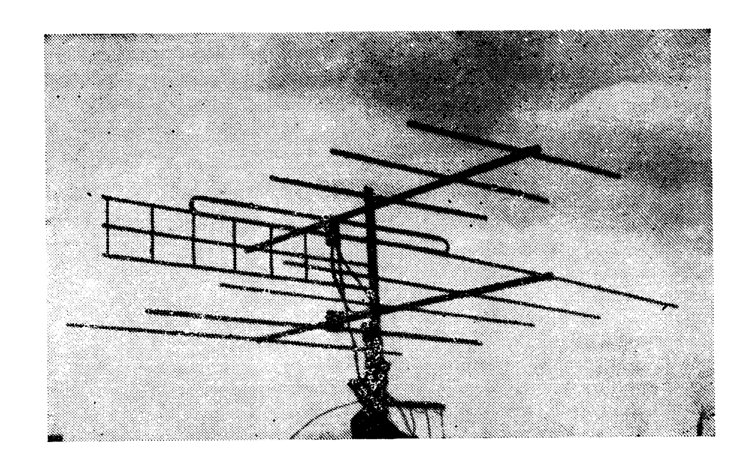


Рис. 54. Антенна для дальнего приема телевидения.

устанавливали радиосвязь с Уфой, Пермью, Кировом. Радиосвязь в этом диапазоне на такие расстояния возможна только благодаря отражению радиоволн от слоя E_c. Характерно, что тем же радиолюбителям из Горького не удавалось установить связь на меньшие расстояния (с г. Иваново, Владимир, Киров).

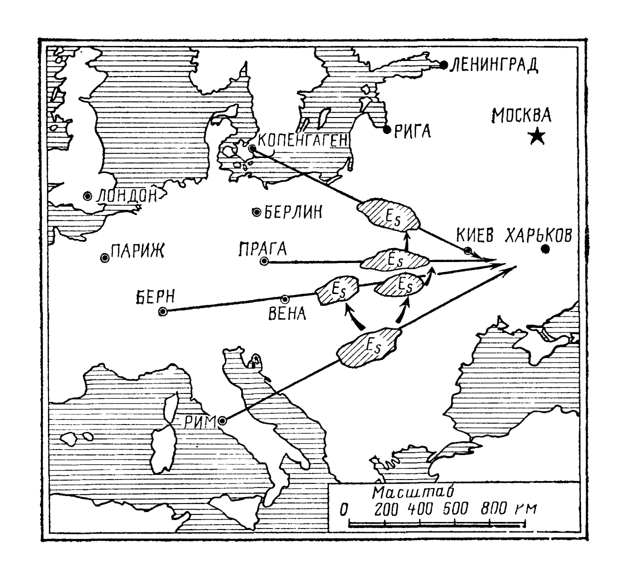


Рис. 55. Перемещение спорадического слоя E_c.

Летом в Кировобаде принимаются телевизионные передачи из Ташкента, в Воркуте — из Москвы, в Ленинграде — из Лондона, а в Кисловодске — из Саудовской Аравии.

Радиолюбители, работающие в УКВ диапазоне на частоте 144 МГц, отмечали начало прохождения радиоволн путем отражения от слоя E_c в 1975 и 1976 гг. с 12 мая, и длилось это прохождение 102—103 дня, что хорошо совпадает со временем наиболее частого появления слоя E_c, отмечаемого ионосферными станциями (см. рис. 18). Интенсивный слой E_c отмечался, например, 20 и 21 июня 1976 г. В эти дни радиолюбители европейской части СССР работали сначала с радиолюбителями юго-восточных стран, потом Болгарии и Италии, а к вечеру со станциями Венгрии и ГДР. Это указывает на перемещение слоя E_c в северо-западном направлении. 24 и 25 июня 1976 г. в г. Люберцы под Москвой наблюдался прием дальних телевизионных передач, и в это же время многие радиолюбители осуществляли дальние связи со станциями Болгарии, Венгрии, Австрии, Чехословакии.

В 1978 г. июнь и июль принесли много интересных дальних радиосвязей с использованием отражений от слоя E_c. Так, 2 июля над юго-восточной Европой образовался интенсивный слой E_c, давший возможность радиолюбителям Севастополя установить радиосвязи с предельным расстоянием в 2400 км. В этот же день из Болгарии были установлены радиосвязи с Францией, Италией, Бельгией, а из Румынии — с Бельгией, Францией, Швейцарией.

Все радиолюбители отмечают, что чаще наблюдается дальний прием телевидения, особенно по 1-му каналу частот 56,25 МГц, затем УКВ ЧМ вещания на частоте 100 МГц, гораздо реже прохождение радиоволн частотой 144 МГц. Распространения радиоволн частотой 430 МГц путем отражения от слоя E_c не наблюдалось.

Возможности сверхдальней связи на УКВ путем отражения волн от слоя E_c далеко не изучены. Однако установлено, что помехи, создаваемые удаленными телевизионными станциями местному приему телевидения, весьма существен-

ны, и нельзя не учитывать возможности сверхдальнего приема при размещении и выборе рабочих волн новых станций. Решить этот вопрос помогли наблюдения радиолюбителей.

РАССЕЯНИЕ НА НЕОДНОРОДНОСТЯХ ИОНОСФЕРНЫХ СЛОЕВ

Рассмотренные явления — отражение от слоев F_2 и E_c — не могут обеспечить регулярной радиосвязи на УКВ. Загруженность диапазона КВ настоятельно требует изыскания возможности работы в новых диапазонах.

Начиная с 1950 г., стали проводить теоретические и экспериментальные исследования возможности регулярной работы УКВ радиолиний на расстоянии свыше 1000 км. Основанием для этого послужило более детальное изучение строения ионизированных слоев атмосферы, установившее их неоднородное строение. Неоднородности можно себе представить в виде облаков, в которых электронная плотность отличается от электронной плотности окружающей среды. Следовательно, и диэлектрическая проницаемость облака отличается от диэлектрической проницаемости окружающей среды.

Размер неоднородностей оценен исследователями в 100—200 м, т. е. для УКВ размер неоднородностей много больше длины волны. Наличие неоднородностей приводит к тому, что наблюдается рассеяние радиоволн. Еще в 30-х годах это явление было обнаружено в диапазоне КВ. При работе мощного коротковолнового передатчика слабые сигналы наблюдались в пределах зоны молчания. Было установлено, что эти сигналы исходили из области ионосферы, от которой отражались радиоволны. Явление это было названо *обратным рассеянием*. Дальнейшие наблюдения показали, что рассеянные сигналы, хотя и очень слабые, могут наблюдаться во время замирания основного сигнала за пределами зоны молчания. Такое рассеяние названо *прямым рассеянием*.

Рассеяние на неоднородностях ионосферы происходит аналогично рассеянию на неоднородностях тропосферы. Падающая на ионизированный слой волна рассеивается отражающей областью, которая служит источником этого вторичного рассеяния.

В течение ряда лет изучались неоднородности ионосферы, их размеры, горизонтальное движение и сделаны были попытки установить причины появления и закономерности, свойственные этим неоднородностям. Однако только с 1950 г. начались попытки применения рассеяния для дальней связи на УКВ.

В 1951 г. в США были поставлены опыты по систематическому наблюдению за приемом сигналов с частотой 50 МГц на расстоянии 1250 км от передатчика. Применялись остронаправленные (ромбические) передающая и приемная антенны и передатчик мощностью 20 кВт. Опыты эти дали обнадеживающие результаты: в течение примерно полугода, когда велись наблюдения, не было ни одного случая нарушения связи. Правда, сигнал был очень слабым, однако достаточным для уверенного приема. Уровень сигнала менялся в течение суток. Конечно, этих наблюдений далеко не достаточно, чтобы сказать, будет ли такой способ связи надежным на других трассах, при других расстояниях, как лучше всего выбрать рабочие частоты и какова должна быть мощность передатчика.

Эти первые опыты побудили ученых всего мира заняться теоретическим и экспериментальным исследованием рассеяния радиоволн в ионосфере. В последующие годы было предложено несколько теорий, дающих формулы для расчета напряженности поля рассеянного сигнала. Однако не было возможности проверить их справедливость.

Только в конце 1955 г. были опубликованы результаты 4-летних наблюдений сверхдальнего регулярного приема метровых волн, проводившихся в США и Канаде. В проведении наблюдений принимали участие ряд научно-исследовательских учреждений и радиолюбители. Наблюдения проводились на семи различных трассах протяженностью 1200—2300 км. Три исследуемые трассы лежали в приполярной области. В этой области радиосвязь КВ особенно подвержена частым нарушениям, и поэтому изыскание возможности других видов связи представляет большой интерес. Остальные трассы лежали в средних широтах.

Передачи велись на частотах 27, 50 и 107 МГц. Использовались передатчики, создающие на входе антенны мощность около 30 кВт. Для приема и передачи применялись одинаковые остронаправленные ромбические антенны с коэффициентом усиления около 20 дБ. Диаграммы направленности антенн были рассчитаны так, чтобы максимум основного лепестка был направлен в среднюю точку пути на высоте 100—120 км. Приемники имели ширину полосы около 2 кГц.

Наблюдения проводились круглосуточно, причем за все годы ни на одной из трасс ни разу не наблюдались нарушения связи, хотя уровень принимаемого сигнала колебался в широких пределах, отличаясь от среднего значения на 20 дБ. Было отмечено, что напряженность поля принимаемого сигнала претерпевает регулярные изменения.

Уровень сигнала достигал максимального значения в полдень, а минимального — в 19—21 ч по местному времени в средней точке. Наибольшие значения напряженности поля наблюдались в дневное время летом. Зимой они были несколько ниже и значительно ниже весной и осенью.

Временами принимались сигналы, отраженные от спорадического слоя E_c и от следов метеорных тел. В этих случаях уровень сигнала значительно повышался или наблюдались отдельные кратковременные всплески. Эти высокие уровни сигнала рассматривались как случайные явления и при анализе не учитывались.

Ранее оставалось неясным, в какой именно области ионосферы происходило рассеянное отражение радиоволн. Проведенные опыты показали, что это рассеяние происходит днем на высоте 75—80 км, а ночью на высоте 85—90 км, т. е. ниже слоя *E*, но несколько выше поглощающего слоя *D*. Более поздние опыты показали, что рассеяние может происходить и на бо́льших высотах, достигающих 150—200 км. Исследование возможностей использования для связи радиоволн, рассеянных на таких высотах, позволит решить вопрос осуществления дальних связей без промежуточных ретрансляционных станций.

Как и следовало ожидать на основании разработанных ранее теорий, напряженность поля волны, рассеянной в ионосфере, зависит от рабочей частоты, убывая обратно пропорционально квадрату частоту. Следовательно, практически применимы для этого типа связи частоты не выше 100 МГц. Особенно ценным свойством рассматриваемого вида распространения радиоволн является устойчивость к тем видам нарушений, которым подвержена связь на КВ.

Во время внезапных вспышек поглощения, вызванных увеличением ультрафиолетовой радиации Солнца, когда возрастает плотность ионизации слоя *D* и происходит замирание сигнала на КВ, интенсивность сигнала на частотах выше 30—35 МГц усиливается. На частотах 25—27 МГц уровень сигнала несколько снижается, так как на этих волнах сказывается увеличение поглощения в слое *D*.

Возрастание уровня напряженности поля рассеянной волны наблюдается также во время ионосферно-магнитных возмущений, когда происходит полное нарушение коротковолновой связи в полярных областях.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выяснить ряд особенностей и преимуществ связи на метровых волнах за счет рассеяния их на неоднородностях ионосферных слоев, а также определить возможную область применения и требования к аппаратуре при данном виде связи. Выяснено, что наилучшие результаты получаются при длине трасс 1000—2300 км. При меньших расстояниях интенсивность сигнала быстро уменьшается. Большие расстояния не могут быть перекрыты путем однократного отражения от ионосферы, а при многократных рассеянных отражениях уровень сигнала чрезвычайно снижается.

Наиболее целесообразным оказывается применение диапазона частот 30—60 МГц. Как указывалось, напряженность поля резко убывает с повышением рабочей частоты, что обусловливает верхнюю границу применимого диапазона. Волны частотой ниже 30 МГц испытывают поглощение, и связь на них подвержена нарушениям, свойственным КВ.

Рассматриваемый вид распространения радиоволн предъявляет повышенные требования к применяемой аппаратуре. Передатчик должен иметь значительную мощность. Например, для одноканальной телеграфной связи в арктических

условиях на частоте 35 МГц необходима мощность передатчика не менее 5 кВт.

Во избежание приема запаздывающих сигналов, приходящих от следов метеорных тел или от слоя E_c, появляющихся в стороне от основной трассы, необходимо применение остронаправленных антенн и сужение полосы пропускания приемника. Практически диаграмма направленности антенны может быть не уже 8°, а ширина полосы не шире 2 кГц.

Для устранения влияния замираний желательно применение двух приемных антенн, разнесенных на расстояние, примерно равное 10λ, в направлении, перпендикулярном направлению распространения.

Основными преимуществами рассматриваемого вида связи можно считать следующие: отсутствие нарушений связи во время ионосферных возмущений, что обеспечивает надежную связь в сложных условиях арктических областей; возможность круглосуточной работы на одной и той же частоте (при работе на КВ рабочие частоты меняются в зависимости от времени года и суток); уменьшение уровня помех. Уровень помех определяется в основном космическими шумами и шумами Солнца. На арктических трассах уровень шумов повышается во время буранов за счет движения снега и кристаллов льда.

Рассматриваемый вид распространения радиоволн может обеспечить радиотелеграфную связь с надежностью 99,5%. В арктических областях надежность связи снижается не более чем на 0,5%. К недостаткам такого вида связи можно отнести повышенные требования к используемой аппаратуре и применимость его только для передачи узкой полосы частот.

Явление рассеяния радиоволн на неоднородностях ионосферы нашло уже практическое применение. Надежность такого вида связи в арктических условиях обусловила использование его именно в этом районе. Первая линия сверхдальней связи на УКВ соединила побережье США через Гренландию с Исландией. Таким образом, для перекрытия расстояния свыше 3000 км потребовалась всего одна промежуточная станция. Эта линия рассчитана на передачу одного телефонного и восьми телеграфных (буквопечатающих) каналов. Имеются сведения о сооружении таких же линий в других странах.

ОТРАЖЕНИЕ ОТ СЛЕДОВ МЕТЕОРОВ

Еще в 1931 г. советским инженером, любителем астрономии Н. А. Ивановым было обнаружено, что при пролете метеорного тела изменяется слышимость коротковолновых станций. С 1946 г. в Советском Союзе начаты наблюдения за метеорами с помощью радиолокационных станций, а с 1952 г. начато изучение возможности радиосвязи путем рассеяния метровых радиоволн на ионизированных следах метеоров. В 1955—1957 гг. начали работать системы радиосвязи, использующие отражение радиоволн от следов метеоров. Этот же способ распространения радиоволн используется радиолюбителями для установления дальних УКВ радиосвязей.

Метеорами называют мелкие тела, вторгающиеся в верхние слои атмосферы и полностью испаряющиеся. Более крупные тела, создающие мощную вспышку при проникновении в атмосферу, называют болидами, а их несгоревшие остатки, достигающие поверхности Земли, представляют собой метеориты.

Метеоры принадлежат Солнечной системе и движутся по разнообразным эллиптическим орбитам со скоростями от 11 до 72 км/с.

Различают метеорные потоки — совокупность метеоров, движущихся с одной скоростью, по определенным орбитам, и спорадические, случайные метеоры, не относящиеся к какому-либо потоку. Орбиты метеорных потоков пересекаются с орбитой Земли в определенное время, и в это время число наблюдаемых метеоров резко возрастает. Потоки бывают постоянно действующие, повторяющиеся ежегодно, или периодические, наблюдаемые не каждый год. Время появления основных постоянных и периодических потоков указано в табл. 1. Название метеорного потока соответствует наименованию созвездия, в направлении которого появляется поток. Наибольшее число потоков наблюдается с мая по сентябрь. В течение суток плотность метеорных потоков непостоянна. На рис. 56 приведен график суточного изменения числа наблюдаемых метеоров, зарегистрированных радиолокационными наблюдениями в г. Харь-

Таблица 1

Поток	Дата начала и конца потока
Постоянно действующие потоки	
Квадрантиды	1—4 января
Виргиниды	14—23 марта
Лириды	20—23 апреля
Аквариды	5—27 мая
Дневные Ариетиды	29 мая — 18 июня
Дневные Персеиды	1—16 июня
Дневные Тауриды	24 июня — 6 июля
Северные Аквариды	4 июля — 3 августа
Южные Аквариды	4 июля — 13 августа
Персеиды	5—14 августа
Южные Ариетиды	10—21 октября
Ориокиды	11—27 октября
Южные Тауриды	15 сентября — 15 декабря
Северные Тауриды	11—23 октября
Гемениды	9—14 декабря
Периодические потоки	
Дракониды	10 октября
Леониды	15—18 ноября

кове в 1959 г., из которого видно, что наибольшее число метеоров наблюдается примерно в 6 ч, а наименьшее в 18 ч по местному времени.

Масса метеорных тел составляет доли грамма, причем преобладают мелкие частицы, массой примерно в десятимиллионную часть грамма (10^{-7} г.).

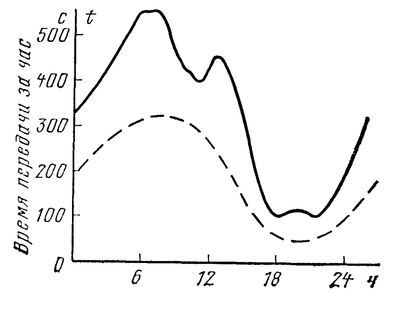


Рис. 56. Частота появления метеоров и отражений от следов метеоров в течение суток.

— — — — — число наблюдаемых метеоров в данный час; ——— — время в секундах, в течение которого в данный час была возможна работа радиолинии.

Таких мелких частиц за сутки в атмосферу Земли попадает до миллиарда (10^{12} метеоров). Атомы испаряющегося метеорного вещества сталкиваются с молекулами атмосферных газов, в результате чего «выбиваются» электроны и в атмосфере на высоте 90—110 км происходит местная ионизация. За каждой частицей возникает ионизированный след, вначале узкий, а затем быстро расширяющийся. Длина следа метеора составляет 15—20 км. Метеорный след быстро рассасывается и существует не долее 10—20 с. При пролете метеорного тела в области действия радиолокатора на экране индикатора отмечается характерное эхо. Наблюдения показали, что отражение происходит на высоте 70—120 км на расстоянии 700—1000 км от станции. Вид отраженных сигналов, наблюдаемых на осциллографе, показан на рис. 57. В момент появления метеорного следа в зоне действия радиолокатора на экране осциллографа появляется резкий всплеск. По мере того на ионное облако следа метеора рассеивается, сигнал уменьшается и замирает. Длительность отражения не превосхо-

дит 10 с, и отражения, длящиеся менее 1 с, наблюдаются в 100 раз чаще, чем отражения, длящиеся около 10 с.

Было обнаружено, что более интенсивные и длительные отражения получаются на более длинных волнах метрового диапазона, а на волнах частотой выше 100 МГц отражения наблюдаются крайне редко.

Радиолокационные наблюдения метеоров натолкнули на мысль о возможности использования отражения радиоволн от следов метеорных тел для радиосвязи.

Первыми и здесь оказались радиолюбители. Еще в 1950—1951 гг. радиолюбителям Канады и США удалось осуществить кратковременные радиосвязи рассматриваемого типа при работе на волнах длиной 10—20 м на расстоянии 1500—2000 км. При этом использовались передатчики мощностью до 500 Вт.

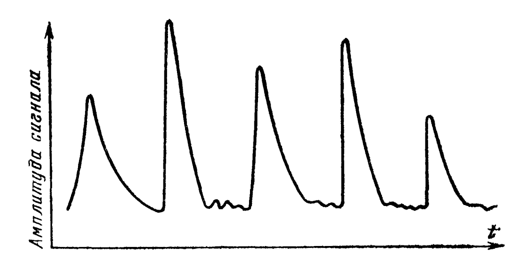


Рис. 57. Осциллограмма сигналов, отраженных от следов метеоров.

В 1955 г. была начата работа по осуществлению экспериментальных линий радиосвязи, использующих кратковременные отражения радиоволн от следов метеоров. В результате были созданы по крайней мере две экспериментальные линии радиосвязи: двусторонняя телеграфная линия связи длиной 1050 км между Оттавой и Порт-Артуром в Канаде и односторонняя телеграфная и телефонная линия длиной 1312 км в Калифорнии. Испытание этих линий показало, что они могут обеспечить связь с большой степенью надежности. Благодаря тому, что метеорные следы существуют в ионосфере только короткие промежутки времени, радиосвязь за счет отражения от следов метеоров может осуществляться только с перерывами. В настоящее время разработана

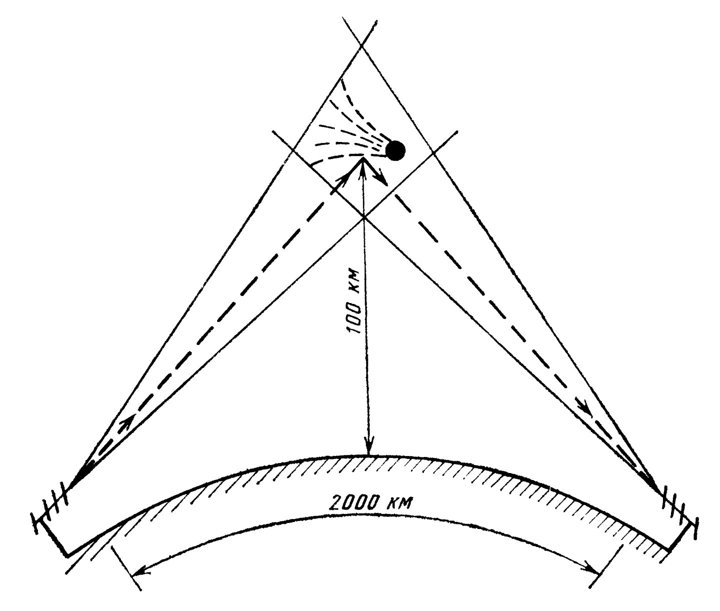


Рис. 58. Схема радиолинии, использующей отражения от следов метеоров.

аппаратура, работающая таким образом, что передача информации происходит только во время присутствия достаточно интенсивных метеорных следов. Такую прерывную работу линии связи называют *методом перемежающейся связи*.

Рассмотрим, как осуществляется работа линии методом перемежающейся связи (рис. 58). На обоих концах линии применяется одинаковая аппаратура. Она включает передатчик и приемник, работающие на общую антенну, управляющее устройство, входной и выходной накопители. В качестве антенн применяются пятиэлементные антенны типа волновой канал, излучающие под таким углом к горизонту, чтобы их диаграммы направленности пересекались на высоте 90—110 км над земной поверхностью. Применение более сложных антенн с узкими диаграммами направленности не дает выигрыша, так как антенны в этом случае облучают меньшую часть небесной сферы и меньшее количество следов метеоров попадает в зону действия антенн и, следовательно, может быть использовано. На радиолиниях, использующих отражения радиоволн от следов метеоров, можно применять волны частотой 30—80 МГц.

В описанной системе оба передатчика непрерывно излучают немодулированные колебания постоянной частоты около 40 МГц. При этом передатчик первой станции и приемник второй работают на одной частоте, а приемник первой станции и передатчик второй — на другой частоте, отличающейся от первой примерно на 1 МГц. Пока в области пересечения диаграмм направленности передающей и приемной антенн нет метеорной ионизации, прием отсутствует. При появлении метеорного следа оба приемника начинают принимать немодулированные колебания, излучаемые корреспондирующими пунктами. Принятые колебания поступают в управляющее устройство (рис. 59), и, если

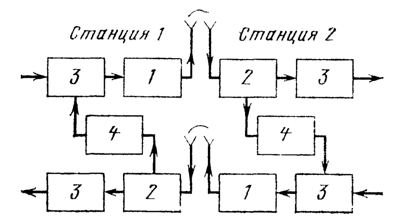


Рис. 59. Система, работающая методом перемещающейся радиосвязи.

1 — передатчик; *2* — приемник; *3* — накопительное устройство; *4* — управляющее устройство.

их уровень превосходит установленное пороговое отношение сигнал/шум, управляющее устройство отпирает манипулятор передатчика. Информация, предварительно зашифрованная специальным кодом, поступает из накопительного устройства передатчика в манипулятор, манипулирующий с большой скоростью несущую частоту передатчика.

Спустя несколько секунд (или долей секунды) после появления метеора след его рассеивается. Уровень принимаемого сигнала падает ниже порогового значения, и управляющее устройство выключает манипулятор.

Принятая информация из накопительного устройства приемника поступает на выход с постоянной скоростью 60 слов в минуту. Во время вспышек информация передается по радиолинии со скоростью 1300 слов в минуту, что несмотря на перемежающийся характер связи дает возможность получить среднюю скорость не ниже обычной. Во входное устройство информация подается в виде перфорированной бумажной ленты. На выходе линии связи в конечном счете получается печатный текст.

Мощность передатчика для работы в системе перемежающейся связи может быть небольшой. В описанной системе использовался передатчик мощностью 750 Вт. Полоса пропускания приемников составляла 3 кГц. За время работы системы было обнаружено, что пропускная способность линии в течение суток меняется примерно так же, как и количество появляющихся метеоров На рис. 57 показано, как изменяется суммарное время передачи за час. Из графика следует, что в 6 ч утра условия работы наилучшие, а в 18—20 ч линию можно использовать наименее эффективно.

Преимущества таких систем связи особенно существенны для приполярных районов, так как такой вид связи не подвержен нарушениям, связанным

с ионосферными бурями, от которых так страдает коротковолновая связь в этих местах.

Существует мнение, что применение системы перемежающейся связи экономически более выгодно, чем использование ионосферного рассеяния метровых волн.

В настоящее время возможность распространения радиоволн путем отражения от метеорных следов используется на радиолиниях различного назначения. Главным образом это линии радиосвязи в приполярных районах, в том числе радиосвязи с самолетами, радиолинии для передачи метеорологических наблюдений, системы дистанционной синхронизации времени.

Всем радиолиниям метеорного отражения свойственны общие особенности. Работа радиолиний возможна в пределах прямой видимости метеорного слоя с передающего и приемного конца радиотрассы; практически предельная протяженность радиолинии составляет 2200 км. При этом не требуется сложных антенных устройств, а мощность передатчика может не превышать 0,5—2 кВт. Для работы радиолиний пригодны волны метрового диапазона (30—80 МГц), на которых уровень помех невысок. При передаче широкополосного сигнала возникают искажения, поэтому по радиолиниям метеорного отражения можно передавать телеграфные сообщения или другие узкополосные сигналы. Необходима сложная аппаратура, обеспечивающая передачу сообщений за время существования метеорного следа.

Радиолюбители не только первыми начали использовать метеорную радиосвязь, но и продолжают развивать этот вид передачи сообщений, способствуя изучению его особенностей и возможностей. В каждом номере журнала «Радио» можно найти сообщение о дальних метеорных радиосвязях радиолюбителей.

Интересно, что радиолюбители работают на более высоких частотах, чем линии регулярной радиосвязи. Конечно, лучше всего устанавливаются дальние радиосвязи во время метеорных потоков. Во время метеорного потока Персеиды с 10 до 13 августа 1976 г. наблюдалось хорошее прохождение радиоволн частотой 144 МГц. Радиолюбители Минска, Кирова и ряда других городов устанавливали радиосвязь с 15 и даже 30 корреспондентами, находящимися на расстоянии до 2000 км. Случаи прохождения радиоволн частотой 430 МГц крайне редки, но 12 августа 1977 г. двум шведским радиолюбителям посчастливилось установить такие связи на расстояние, превышающее 1000 км.

В декабре 1977 г. во время потока Геменид радиолюбитель из Ростова-на-Дону установил радиосвязь на частоте 144 МГц с пятью корреспондентами. Во время потока Акварилов в мае и июле 1979 г. смоленскому радиолюбителю удалось установить радиосвязь с корреспондентами из Югославии, Швеции, Бельгии.

Возможно, что наблюдения радиолюбителей позволят в дальнейшем использовать и для радиолиний регулярной связи частоты выше 100 МГц.

АВРОРАЛЬНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ

Авророй называют полярные сияния, а распространение радиоволн путем отражения от области полярного сияния — авроральным. Это необычное природное явление давно привлекло к себе внимание исследователей. Наблюдая полярные сияния, М. В. Ломоносов высказал предположение о том, что они вызываются мельчайшими заряженными частицами. Дальнейшие наблюдения подтвердили это предположение и показали, что полярные сияния представляют собой области с повышенной ионизацией газа и имеют то же происхождение, что и ионосферно-магнитные бури. Оба эти явления возникают одновременно и проявляются главным образом в приполярных областях, вблизи геомагнитных полюсов; в средних широтах полярные сияния редки. На рис. 60 показана область полярных сияний, имеющая вид неправильного овала, границы которого непрерывно меняются. Овал полярных сияний асимметричен, и поэтому по мере вращения Земного шара наблюдателю, расположенному, например, в некотором пункте на 70-й параллели, кажется, что вечером овал полярных сияний перемещается с севера на юг, а поздней ночью в обратном направлении. Полярные сияния появляются наиболее часто в то время года,

когда наиболее часты геомагнитные возмущения и ионосферно-магнитные бури, а, следовательно, во время равноденствий — в марте—апреле и в сентябре—октябре. Кроме того, имеется прямая зависимость между активностью Солнца и появлением полярных сияний. В годы максимума солнечной деятельности полярные сияния появляются примерно в пять раз чаще, чем в году минимума. Наблюдается также 27-дневная повторяемость полярных сияний, соответствующая солнечным суткам. Интенсивность и конфигурация овала полярных сияний меняются в зависимости от уровня геомагнитных возмущений. Во время интенсивных ионосферно-магнитных бурь овал расширяется так, что может достигнуть области средних широт. Были случаи, когда полярное сияние наблюдалось в Москве.

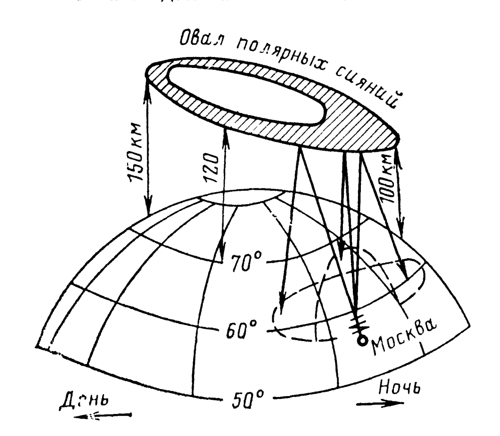


Рис. 60. Овал полярных сияний и зоны возможных авроральных радиосвязей радиолюбителей Москвы.

Рис. 61. Распределение электронной плотности по высоте полярного сияния.

Полярные сияния первоначально наблюдали визуально, по характеру свечения неба. Формы свечения полярного сияния разнообразны: то это желтовато-зеленое свечение всего небосвода, то мерцающее голубоватое свечение, то яркие полосы или лучи, спокойные или движущиеся, изменяющейся окраски. Одни формы переходят в другие и комбинируются. Критерием интенсивности полярных сияний является их яркость. После того как было обнаружено, что от области полярных сияний отражаются радиоволны метрового диапазона, для исследования полярных сияний стали применяться радиолокационные методы. Было выяснено, что более яркие полярные сияния обладают большей отражающей способностью. Измерили электронную плотность в области полярных сияний. Пример распределения электронной плотности в полярном сиянии показан на рис. 61. Нижняя граница полярных сияний расположена на высоте 80—110 км, а верхняя на высоте 140—160 км, но иногда достигает 700—800 км. Плотность электронов в полярном сиянии на высоте 100—130 км достигает $(7—8)\cdot 10^5$ э/см^3, что гораздо больше электронной плотности спокойной ионосферы на этой высоте, как это показано на рис. 15. Такая электронная плотность мала для отражения метровых волн. Действительно, используя формулу (10), легко подсчитать, что при нормальном падении радиоволны на ионизированный слой такой плотности будут отражаться только волны, частота которых не более 8 МГц.

Поэтому предполагают, что отраженная волна образуется при рассеянии радиоволн на неоднородностях электронной плотности полярного сияния. Электронная плотность в этих неоднородностях отличается от электронной плотности окружающей среды всего на одну ее тысячную часть. По форме неоднородности представляют цилиндры, вытянутые в направлении магнитного поля Земли. Таким образом, отражение радиоволн происходит как бы от решетки, состоящей из полос ионизированного газа.

Отражения от полярных сияний широко используются радиолюбителями для установления дальних радиосвязей в метровом диапазоне волн. При этом корреспонденты могут находиться на значительном расстоянии от области полярных сияний. Важно только, чтобы область полярного сияния находилась на расстоянии, не превышающем дальность прямой видимости, которую легко подсчитать по формуле (19). В этом случае за h_2 следует брать высоту нижней границы полярного сияния. Приняв среднее значение высоты полярного сияния 100 км, получим, что расстояние прямой видимости до полярного сияния составит примерно 1000 км. Таким образом, возможна радиосвязь между двумя корреспондентами, находящимися на расстоянии не более 1000 км к югу от области полярного сияния.

Для осуществления радиосвязи антенны корреспондентов должны быть ориентированы на область полярных сияний. Авроральная радиосвязь возможна при полярных сияниях средней силы в северо-западном и северо-восточном направлениях. Так, радиолюбители Москвы осуществляют в этих случаях уверенные радиосвязи с радиолюбителями Таллина, Хельсинки, Сыктывкара, Кирова. При сильных полярных сияниях возможна радиосвязь в восточном и западном направлениях (рис. 60). Во время сильной «авроры» 26 марта 1976 г. радиолюбители Москвы осуществляли радиосвязь с радиолюбителями Дании, ФРГ и даже Италии и Чехословакии. В 1979 г. сильные «авроры» наблюдались 13, 19, 25, 27, 29 августа. Ультракоротковолновики устанавливали радиосвязи с Финляндией и Швецией; 29 августа «аврора» спустилась до северных границ Украины, причем отражения были достаточно интенсивными не только на волнах частотой 144 МГц, но и на 430 МГц. Обычно сеансы радиосвязи начинаются в 17—19 ч по местному времени и с перерывами продолжаются до 4—5 ч утра.

Большую работу по наблюдению и обобщению случаев аврорального распространения радиоволн провел москвич мастер спорта С. Бубенников. Он определил зоны возможного приема радиоволн, отраженных от полярных сияний (рис. 60 заимствован из его работы).

Конечно, радиосвязь этого вида легче устанавливается в северных областях. Сведения об установлении радиосвязей типа «аврора» регулярно публикуются на страницах журнала «Радио». Радиолюбители в основном используют диапазон частот 144—146 МГц, однако, появляются сообщения об осуществлении радиосвязей и на частоте 430 МГц.

При этом виде радиосвязи сигнал подвержен сильным замираниям и искажениям, но характер замираний отличается от наблюдаемого при метеорной радиосвязи или при отражении от спорадического слоя E_c: наблюдается так называемый «авроральный феддинг».

Для авроральной радиосвязи характерен повышенный уровень шумов, источником которых является сама отражающая область ионосферы.

Для прогнозирования возможности авроральной радиосвязи можно использовать прогноз ионосферно-магнитных бурь, о котором упоминалось ранее.

УКВ РАДИОЛИНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

СПУТНИКИ — ПАССИВНЫЕ И АКТИВНЫЕ РЕТРАНСЛЯТОРЫ

Со времени запуска первого советского искусственного спутника Земли (ИСЗ) мысль о возможности использования спутников для увеличения дальности действия УКВ радиолиний приобрела реальную основу. Создание новых систем спутников, запускаемых на различные орбиты, разработка антенн с большим коэффициентом усиления, использование квантовомеханических усилителей, позволяющих значительно повысить чувствительность наземных приемных устройств, а также создание передатчиков большой мощности и применение весьма эффективных методов модуляции дали возможность решить задачу использования искусственных спутников Земли для дальней УКВ радиосвязи, передачи телевидения, наблюдения за погодой.

Подобные радиолинии состоят из наземной приемной и передающей станций и некоторого числа спутников, выполняющих роль промежуточных станций. Спутники могут работать как активные и как пассивные ретрансляторы.

Пассивные ретрансляторы обычно представляют собой пустотелые шары диаметром несколько десятков метров, поверхность которых металлизирована. Так, американский спутник «Эхо-2», запущенный в 1964 г., представляет собой надувной шар диаметром 41 м. Пассивные ретрансляторы делятся на стабилизированные, ориентированные определенным образом относительно Земли, и нестабилизированные. Стабилизированные пассивные ретрансляторы требуют применения электронных систем управления пространственным положением аппарата, что ликвидирует их основное достоинство — простоту.

Пассивные ретрансляторы отличаются большой надежностью, долговечностью и могут служить для передачи широкой полосы частот без искажений. Недостатком пассивных ретрансляторов является требование большой мощности наземных передатчиков и высокого коэффициента усиления передающих и приемных антенн. Мощность сигнала в приемной антенне сильно ослаблена: она оказывается обратно пропорциональной квадрату произведения расстояний от передающей антенны до спутника и от спутника до приемной антенны.

При применении активных ретрансляторов на спутнике принятый с Земли сигнал усиливается и затем передается на приемную наземную станцию. Активные ретрансляторы могут работать с задержкой и без задержки. При работе с задержкой принятый над передающим пунктом сигнал на спутнике «запоминается» и передается в нужном месте над другим пунктом на приемную станцию. При работе без задержки спутник непрерывно передает принятые сигналы, только на другой частоте.

Активные ретрансляторы требуют установки на спутниках приемно-передающих устройств, что снижает надежность и долговечность их работы. При использовании активных ретрансляторов не предъявляется высоких требований к мощности наземного передатчика и направленности наземных антенн. Для получения одной и той же мощности в приемной наземной антенне активный спутник-ретранслятор должен иметь существенно меньшую массу, чем пассивный. Активный спутник позволяет передать больше информации в единицу времени, чем пассивный.

Сложным вопросом является выбор орбиты для каждого конкретного спутника с учетом его назначения. Необходимо учитывать количество и расположение наземных пунктов, характер передаваемой информации, параметры ракеты-носителя, влияние космических условий — рентгеновского и ультрафиолетового излучения и много других факторов.

Понятно, что ретрансляция возможна только в те отрезки времени, когда спутник находится в пределах прямой видимости от передающей и приемной наземных станций. Оказывается, что зона видимости существенно расширяется только при увеличении высоты спутника до 8000 км, дальнейшее увеличение высоты влияет мало. С точки зрения постоянства зоны связи и постоянства уровня сигнала выгоднее круговые орбиты с постоянным расстоянием от поверхности Земли. Но эллиптическая орбита может экономичнее обеспечивать работу радиолиний в ограниченном диапазоне широт, например над территорией Советского Союза. С другой стороны, уровень сигнала при эллиптической орбите непостоянен, так как меняется расстояние до спутника и необходимо менять усиление сигнала. Установлено, что если высота спутника не превышает 9250 км, то можно применять сравнительно простые спутники и устанавливать на них ненаправленные антенны. На больших высотах целесообразно применять направленные стабилизированные антенны.

Для обеспечения непрерывной радиосвязи между двумя пунктами необходимо несколько спутников и тем больше, чем ближе к Земле проходят их орбиты.

Весьма привлекательной представляется мысль об использовании стационарных спутников, скорость движения которых выбрана таким образом, что они постоянно находятся над одним и тем же пунктом на поверхности Земли, как бы «висят» над Землей. Система из трех таких спутников могла бы обеспечить прием и передачу радио и телевидения в любые точки земного шара, кроме приполярных районов. Однако выход из строя одного спутника нару-

шает работу всей системы; необходима большая мощность передатчиков, устанавливаемых на спутниках, а также возникает ряд других сложностей.

Выбор экономически выгодного варианта системы спутниковой радиолинии весьма сложен. Стоимость радиолинии распределяется между стоимостью самого спутника, стоимостью его запуска и стоимостью наземных станций. Радиолиния оказывается экономически оправданной, если продолжительность безотказной работы спутника составляет несколько лет.

Выделение диапазона рабочих частот для спутниковых радиолиний также оказалось нелегкой задачей. Пригодны только УКВ, поскольку только для этих волн ионосфера прозрачна. Диапазон УКВ сильно загружен, и частоты, выделенные для спутниковых радиолиний, совпадают с частотами некоторых наземных радиолиний. Необходимо применять специальные меры по устранению взаимных помех на этих линиях путем ограничения мощности передатчиков и ориентации направленных антенн.

Установлено, что оптимальные условия работы с точки зрения ослабления сигнала и уровня внешних шумов имеют место на частотах 2000—6000 МГц. Сигнал, принимаемый на земле, оказывается очень слабым, поскольку мощность передатчика на спутнике ограничена источниками питания и не превосходит 50 Вт, а потери на сферическую расходимость волны (в свободном пространстве) достигают 150 дБ. Прием таких слабых сигналов приводит к необходимости применения очень больших приемных антенн и приемников с малым уровнем шумов.

Расчет мощности в приемной антенне или необходимой мощности передатчика при заданной мощности в приемной антенне ведется по формуле (3). Кроме того, необходимо учесть потери энергии волны в тропосфере и ионосфере.

СПУТНИКИ СВЯЗИ «МОЛНИЯ»

В апреле и октябре 1965 г. в Советском Союзе были запущены первые два спутника связи — активных ретранслятора «Молния-1», имеющих эллиптическую орбиту с апогеем 39 380 км и перигеем 497 км. Период обращения спутников вокруг Земли 11 ч 48 м. Благодаря тому, что апогей приходится на Северное полушарие, спутники в течение 9 ч видны с территории Советского Союза. Вскоре был выведен на орбиту еще ряд спутников типа «Молния-1», а позднее были запущены более совершенные спутники «Молния-2», «Молния-3» и др. Спутники типа «Молния» являются активными ретрансляторами и представляют собой весьма сложные устройства. Вид спутника «Молния-1» представлен на рис. 62. На рисунке видны большие «лопасти» — солнечные батареи. Во время полета спутник должен быть ориентирован плоскостью солнечных батарей на Солнце, с тем чтобы обеспечить наибольшую их освещенность и получить электроэнергию от всей площади батарей. На спутнике имеются две параболические антенны — рабочая и резервная. Во время сеансов радиосвязи рабочая антенна направляется на Землю и с высокой точностью с помощью специального привода и датчика ориентации следит за Землей. После ориентации антенны на Землю включается аппаратура ретрансляции. Для работы с резервной антенны спутник необходимо повернуть вокруг продольной оси.

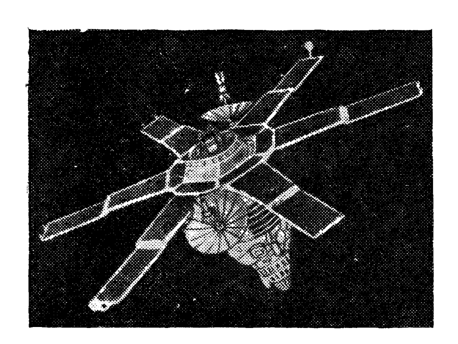


Рис. 62. Спутник-ретранслятор «Молния».

Ретранслятор спутника «Молния-1» работает как линейный усилитель сигналов наземных станций. Такой ретранслятор принимает сигналы с Земли, усиливает их до необходимого уровня и без искажений и задержки передает на

Землю. Бортовая антенна спутника имеет хорошую направленность и большой коэффициент усиления. Это обеспечивает создание значительной напряженности поля в данном месте на поверхности Земли.

Ретранслятор спутника по команде с Земли может выполнять одну из следующих функций: ретранслировать одну телевизионную программу; ретранслировать большое число двусторонних телефонных и телеграфных передач. При этом в процессе передачи телевидения качество передачи непрерывно контролируется.

Прием передач ведется на наземных станциях «Орбита», антенны которых снабжены поворотными и программными устройствами и следящими системами. Вид антенн приемной станции «Орбита» показан на рис. 63.

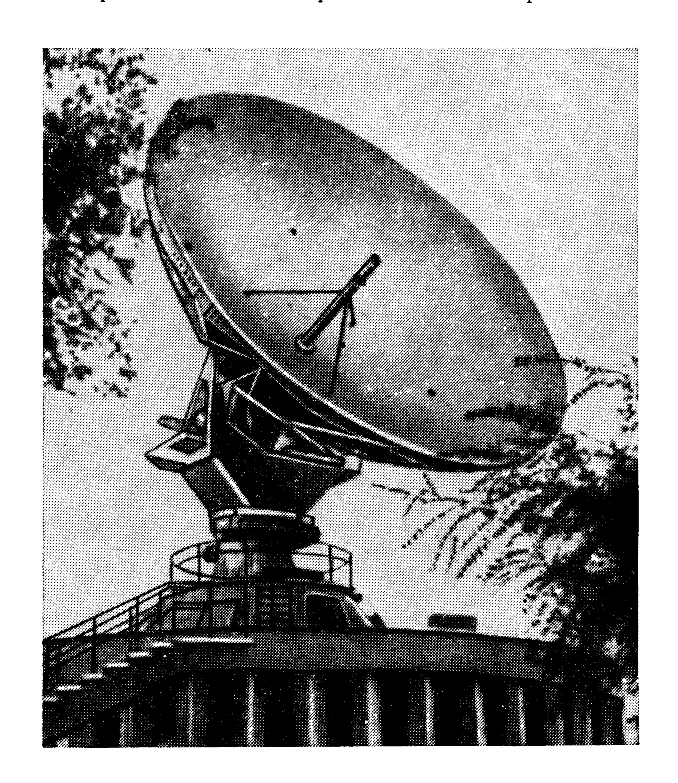


Рис. 63. Приемная антенна станции «Орбита».

Станции «Орбита» размещаются по всей территории Советского Союза и позволяют вести прием в самых отдаленных уголках страны. Число этих станций с каждым годом растет.

Радиолюбители не остаются в стороне и от решения задачи ретрансляции радиоволн через ИСЗ. Осуществлен запуск специальных спутников-ретрансляторов для радиолюбительских связей. Несомненно, и этот вид радиолюбительства найдет своих энтузиастов.

СИСТЕМА МОРСКОЙ СВЯЗИ «ИНМАРСАТ»

«Инмарсат» — так называется международная организация, работающая над созданием спутниковой системы морской связи и радионавигации. Советский Союз принимает активное участие в работе этой организации.

Где бы ни находилось судно, ему необходимо непрерывно поддерживать радиосвязь с берегом — получить инструкции, связаться с портом назначения, информировать о состоянии судна, а в случае крайней необходимости передать сигнал SOS. Считают, что наиболее целесообразно такую связь осуществлять с помощью спутников Земли.

Проектируемая спутниковая система морской связи охватит территорию в полосе широт от 70° с. ш. до 70° ю. ш. и, таким образом, обеспечит радиосвязью корабли, находящиеся во всех океанах, кроме Ледовитого. Три спутника будут иметь стационарные орбиты и как бы повиснут над тремя океанами — Тихим, Атлантическим и Индийским. Предусмотрено размещение значительного числа береговых станций, которые будут поддерживать радиосвязь через спутник с судами.

Для морской спутниковой радиосвязи выделены специальные полосы частот в сантиметровом диапазоне волн.

Радиосвязь между судами и ИСЗ будет осуществляться на частоте 1500 или 1600 МГц, а радиолиния между береговыми станциями и ИСЗ будет работать на частотах 4000, 6000, 11 000, 14 000 МГц.

Разработана аппаратура для работы радиолинии спутниковой связи с судами. Береговые станции будут иметь параболические антенны диаметром 12 м с коэффициентом усиления 50 дБ и шириной диаграммы направленности 1°. Береговая станция будет излучать мощность 1 кВт. Судовая антенна имеет гораздо меньший размер — это параболическая антенна диаметром 1,2 м. Поэтому она имеет меньший коэффициент усиления — 23 дБ и более широкую диаграмму направленности — 10—11°, излучаемая мощность 40 Вт.

Наибольшие сложности представляет создание спутниковой антенны. Она должна принимать сигналы от всех судов, т. е. быть ненаправленной для радиолинии ИСЗ — судно и, в то же время передавать сигналы на наземную станцию узким направленным лучом.

Наиболее ответственной задачей системы радиосвязи с судами является обеспечение безопасности мореплавания. Сигналы бедствия SOS будут всегда передаваться немедленно, тогда как другие виды передачи будут передаваться в порядке очереди, которая устанавливается береговыми станциями. Суда, терпящие бедствие, будут выбрасывать буи со специальными передающими устройствами, которые через ИСЗ будут передавать сообщения о местоположении судна. Все это обеспечит своевременную передачу и прием сигналов SOS.

В дальнейшем будет разработана система для навигации судов при помощи тех же спутников.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ НА КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛИНИЯХ

МЕЖПЛАНЕТНАЯ СРЕДА

Распространение радиоволн в межпланетном пространстве — космосе до создания искусственных спутников Земли изучалось путем наблюдения за радиоизлучением небесных тел, являющихся источниками радиоволн широкого диапазона частот. В настоящее время измерения плотности и состава газа в межпланетном пространстве ведутся главным образом при помощи приборов, устанавливаемых на спутниках и космических кораблях. Газ в межпланетном пространстве состоит из электронов и протонов, концентрация которых одинакова.

Основным источником ионизированных частиц в межпланетном пространстве является Солнце, окруженное солнечной короной. Солнечная корона представляет собой гигантскую ионосферу, газ в которой полностью ионизирован. Корона простирается на расстояние в несколько солнечных радиусов. Исследования показали, что ионизированные частицы движутся по радиальным направлениям от Солнца, что обусловливает определенное распределение электронной плотности в межпланетной среде. Средняя электронная плотность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца. Межпланетный ионизированный газ неоднороден. Он имеет крупные неоднородности

типа выброшенных Солнцем струй и облаков вещества, размеры которых достигают миллиона километров, и мелкие неоднородности, подобные турбулентной неоднородности движущегося газа, со средним размером 200 км. В неоднородностях плотность ионизированного газа отличается на 2—3% от среднего значения. Межпланетный газ изменчив, и при возмущениях, происходящих на Солнце, его структура и плотность меняются. Характерной особенностью межпланетной среды является секторная структура: внутри отдельных секторов пространства электронная плотность может иметь повышенное значение.

На распространение радиоволн в межпланетном пространстве основное влияние оказывают неоднородности межпланетной плазмы, поскольку ее средняя электронная плотность невелика. Действительно, вблизи Земли, на расстоянии примерно 150 млн. км от Солнца, электронная плотность межпланетного газа составляет примерно 60 э/см^3, и от него могут отражаться радиоволны частотой ниже 70 кГц. Однако, неоднородности межпланетного газа, движущиеся со скоростями 300—800 км/с, вызывают колебания амплитуды, фазы и угла прихода радиоволн. Эти явления зависят от относительного расположения Земли, Солнца и межпланетной станции и возрастают с увеличением длины волны.

РАДИОЛИНИЯ ЗЕМЛЯ — КОСМИЧЕСКИЙ КОРАБЛЬ

Космические радиолинии решают следующие основные задачи: радиосвязь пилотируемых космических кораблей с Землей и между собой; радионаблюдение за полетом и управление полетом космических кораблей; передача с космического корабля радиотелеметрической информации (результатов измерений режима работы аппаратуры, параметров полета, данных научных наблюдений); изучение космоса, поверхностей и атмосфер планет; сбор метеорологических данных.

Траектория искусственных спутников Земли и космических кораблей имеет три характерных участка. На начальном, стартовом участке траектории спутник с ракетой-носителем при работающих двигателях движется в сравнительно плотных слоях атмосферы, где происходит отделение отработанных ступеней ракеты. На втором участке траектории скорость движения спутника несколько превышает первую космическую скорость, и движение вокруг Земли происходит по эллиптической орбите в сильно разряженной атмосфере.

Скорость космического корабля на втором участке траектории превышает вторую космическую скорость, корабль выходит из поля тяготения Земли и движется в межпланетном пространстве. Протяженность радиолинии космический корабль — Земля может достигать сотен миллионов километров. Третий участок траектории соответствует возвращению спутника или корабля и вхождению его в плотные слои атмосферы. На первом и третьем участках траектории расстояния от наземных станций до спутника невелики, и распространение радиоволн осуществляется в пределах прямой видимости. На распространение радиоволн на этих участках траектории основное влияние оказывает образующийся вблизи спутника ионизированный газ, электронная плотность которого на несколько порядков выше, чем в ионосфере.

Основной проблемой при изучении распространения радиоволн на первом восходящем участке траектории спутника или космического корабля является влияние ионизации струи газа, истекающего из сопла ракетного двигателя. Во время включения ракетного двигателя струя газа не имеет четких границ и может окружить всю ракету. При этом газ содержит вещества, которые при высокой температуре струи легко ионизируются. Антенны, расположенные на спутнике или космическом корабле, оказываются окруженными оболочкой ионизированного газа, что приводит к ухудшению условий радиосвязи между спутником и Землей. Спустя некоторое время, необходимое для выхода двигателя на режим, струя двигателя приобретает определенную конфигурацию в виде расширяющегося потока. Электронная плотность убывает примерно обратно пропорционально расстоянию от сопла двигателя. Максимальная электронная плотность, имеющая место вблизи сопла двигателя, достигает 10^{11} э/см^3.

Если рабочая частота достаточно высока, то радиоволны проходят через струю газа, испытывая при этом поглощение, которое уменьшается с повышением рабочей частоты.

По оценкам, имеющимся в литературе, при прохождении радиолинии через центральную, наиболее плотную часть струи поглощение на волне длиной 3 см составляет 3 дБ, а на метровых волнах радиосвязь оказывается невозможной.

На втором участке в зависимости от высоты нахождения спутника и от длины рабочей волны распространение радиоволн невозможно как в пределах прямой видимости, так и за ее пределами. На условия работы радиолинии оказывает основное влияние тропосфера и ионосфера Земли.

На радиолинии Земля — космический корабль определяющим является ослабление сигнала из-за большой протяженности трассы (формула (4)) и поглощение в атмосфере Земли.

График на рис. 64 иллюстрирует величину этих потерь в свободном пространстве для радиолиний различной протяженности, работающих в широком диапазоне частот. При построении графика считалось, что применяются ненаправленные антенны ($G_{\text{пер}} = G_{\text{пр}} = 1$ или $G_{\text{пер}}(\text{дБ}) = G_{\text{пр}}(\text{дБ}) = 0$).

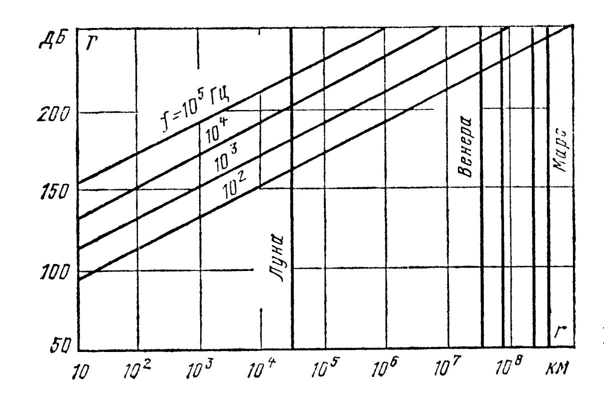


Рис. 64. Потери на космических радиолиниях.

На графике отмечены расстояния до Луны, Венеры, Марса. Потери увеличиваются с возрастанием рабочей частоты и на космических радиолиниях достигают очень больших значений. Например, на волне частотой 100 МГц на расстоянии 1000 км потери составят 133 дБ, а на трассе Земля — Луна (расстояние 384 400 км) — 184,6 дБ.

Диапазон частот, пригодный для работы радиолинии Земля — космический корабль или спутник, ограничен поглощающими и отражающими свойствами земной атмосферы. Радиоволны длиннее 10 м отражаются от ионосферы и поэтому непригодны для радиосвязи с объектами, находящимися за ее пределами. Поглощение радиоволн в ионосфере с повышением рабочей частоты убывает. При прохождении всей толщи ионосферы волнами, частота которых выше 100 МГц, поглощение не превышает 0,1 дБ. Во время внезапных вспышек поглощения потери возрастают.

Рассеяние поля радиоволн неоднородностями ионосферы и интерференция прямых и рассеянных волн приводит к замиранию амплитуды радиосигналов, прошедших через ионосферу. Для обеспечения непрерывного приема таких сигналов их расчетная мощность должна быть увеличена в метровом диапазоне волн на 2—6 дБ. Расчеты и наблюдения показывают, что влияние рассеяния падает с частотой и на волне 10 см необходим запас мощности только 0,1 дБ.

Верхняя граница частот, применимых на космической радиолинии, определяется поглощением радиоволн в тропосфере и достигает примерно 10 000 МГц. При расположении наземного корреспондента на высоте около 5 км над Землей верхняя граница рабочих частот может быть повышена до 40 000 МГц.

Для радиолинии Земля — ИСЗ, траектория которого проходит ниже основного максимума электронной плотности ионосферы, применимы КВ. Отражение и поглощение КВ в этом случае подчиняется тем же законам, что и на наземных радиолиниях.

При определении угловых координат космического объекта радиотехническими методами вследствие рефракции направление прихода волны, отраженной от объекта или излученной с него, не совпадает с истинным направлением на объект. Угол между истинным направлением на космический объект (АС) и касательной к траектории волны в точке расположения приемной антенны (АК) называется *рефракционной ошибкой* (угол $\Delta\varphi$ на рис. 65). Для точного определения угловых координат космических объектов радиотехническими методами необходимо вносить поправки на рефракционные ошибки, которые определяются теоретическим путем. С достаточной степенью точности можно считать, что ошибки, вызванные рефракцией в тропосфере и ионосфере, суммируются.

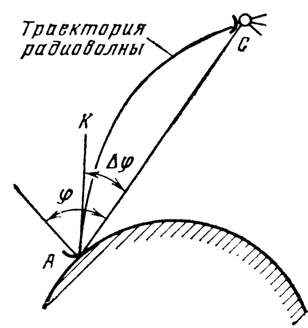


Рис. 65. Рефракционная ошибка определения направления на спутник.

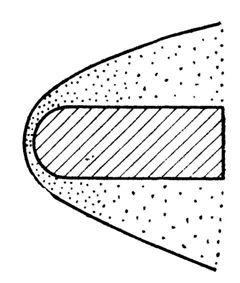


Рис. 66. Ударная волна, образующаяся вблизи спутника при вхождении его в плотные слои атмосферы.

Ошибки, вызванные влиянием тропосферы и ионосферы, соизмеримы при рабочей частоте около 200 МГц. На частотах 50—100 МГц тропосферную рефракцию можно не учитывать. На частотах выше 400 МГц ошибки, вносимые ионосферой, ничтожно малы. Тропосфера и ионосфера являются неоднородными средами, параметры которых непрерывно изменяются, отклоняясь от средних значений. Изменения коэффициентов преломления этих сред приводят к изменениям угла прихода радиоволн, и поправка на зенитный угол помимо среднего значения имеет изменяющуюся нерегулярную составляющую.

При определении расстояния до спутника или космического корабля радиотехническими методами возникают ошибки, вызываемые тем, что не учитывается различие скоростей распространения волны в свободном пространстве и атмосфере — тропосфере и ионосфере.

Ошибка, вносимая тропосферой в определение расстояния, мало зависит от закона изменения показателя преломления тропосферы с высотой, совсем не зависит от рабочей частоты и может достигать 30—80 м. Величина ошибки, вносимой ионосферой, меняется с изменением электронной плотности в ионосфере, но мало зависит от закона изменения электронной плотности с высотой. С увеличением угла возвышения наблюдаемого объекта ошибка уменьшается. Ошибки, вносимые ионосферой в определение расстояний, на частоте 100 МГц при небольших углах возвышения наблюдаемого объекта могут достигать 2—4 км, а на частоте 1000 МГц они не превышают 40 м.

Многочисленные испытания возвращаемых спутников показали, что при вхождении спутника в плотные слои атмосферы, когда высота над поверхностью Земли не превышает 100 км, радиосвязь, со спутником становится невозможной. Понятно, что поддержание радиосвязи в случае приближения спутника к Земле особенно важно, когда на его борту находится экипаж.

Причиной отсутствия радиосвязи является образование вблизи спутника слоя ионизированного газа большой электронной плотности. Спутник прибли-

жается к Земле со сверхзвуковыми скоростями, достигающими 6—8 км/с. На высотах, где воздух достаточно плотный, перед спутником возникает ударная волна (рис. 66). За фронтом ударной волны происходит повышение температуры свыше 3000° и плотности газа до нескольких атмосфер.

При таких температурах молекулы газа приобретают большие скорости, и происходит процесс ионизации газа.

Ионизированный газ стекает вдоль боковой поверхности тела спутника. Пространство между телом и фронтом ударной волны увеличивается с расстоянием, а следовательно, электроны распределяются на больший объем и электронная плотность снижается, как это схематически показано на рис. 66 (густота точек качественно характеризует плотность электронов). Спутник оказывается окруженным раскаленным ионизированным газом, а за ним тянется ионизированный след большой протяженности до 10—20 км. Наибольшая электронная плотность образуется при движении спутника на высоте 40—60 км над поверхностью Земли, где они достигают 10^{15} э/см^3. Следовательно, волны вплоть до миллиметровых не распространяются в этом ионизированном газе. Во всем радиочастотном диапазоне поглощение оказывается чрезвычайно большим, и выбором рабочей частоты невозможно улучшить условия радиосвязи. Даже в том случае, когда полного нарушения радиосвязи не происходит, присутствие поглощающего и отражающего ионизированного газа вблизи антенны приводит к изменению входного сопротивления антенны, рассогласованию ее с линией питания, искажению формы диаграммы направленности.

Для борьбы с нарушением радиосвязи при вхождении спутника в плотные слои атмосферы предлагают располагать антенны на боковой поверхности спутника в области меньшей электронной плотности. Делаются попытки уменьшить плотность ионизации введением деионизирующих веществ. Путем наложения постоянного магнитного поля стремятся улучшить условия прохождения радиоволн. Однако в настоящее время проблема осуществления радиосвязи со спутником при вхождении его в плотные слои атмосферы еще не решена.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ И АТМОСФЕР ПЛАНЕТ РАДИОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Если космический корабль направлен на одну из планет, то при вхождении корабля в атмосферу планеты условия радиосвязи изменяются в зависимости от радиофизических свойств атмосферы и поверхности планеты. Для обеспечения работы радиолинии Земля — космический корабль при вхождении его в атмосферу планет и спуска на поверхность планет необходимо знать радиофизические характеристики поверхностей и атмосфер планет.

Первые сведения о Вселенной были получены в результате наблюдений и измерений попадающего на Землю электромагнитного излучения. Сначала при этих наблюдениях ограничивались длинами волн, лежащими в области видимых и близких к ним лучей, т. е. использовались методы оптической астрономии. Применение волн другой длины увеличило возможности экспериментального познания Вселенной. Отмечалось, что волны длиннее 10—15 м отражаются от ионосферы и не проникают за пределы земной атмосферы (или из-за ее пределов на Землю). Волны короче 1 см поглощаются в тропосфере. Таким образом, для «связи» со Вселенной могут служить УКВ длиной 10 м — 1 см, но в последнее время применяются и миллиметровые волны.

Идея изучения Вселенной при помощи радиоволн зародилась тогда, когда было обнаружено, что Солнце и Галактика являются мощными излучателями радиоволн. В настоящее время уже широко развилась наука, занимающаяся изучением космических тел по их радиоизлучению, получившая название *радиоастрономии*.

Первое доказательство существования радиоизлучения из космоса было получено в 1932 г., когда на волне 15 м наблюдались хаотические сигналы — шумы, интенсивность которых менялась в течение дня и имела период, равный звездным суткам. Это указывало на то, что источник излучения должен находиться за пределами солнечной системы. Дальнейшие наблюдения показали, что интенсивность излучения была максимальной, когда антенны направлялись

в центр Галактики, т. е. что источники излучения находятся в центре Галактики. Главным очагом радиоизлучения является район созведий Скорпиона и Тельца.

Последующие измерения проводились на волнах длиной 50 см — 15 м. Было обнаружено, что интенсивность излучения пропорциональна кубу длины волны. Источником излучения могут служить межзвездный газ и звезды. Такие же измерения проводились с целью обнаружения аналогичного излучения Солнца. На волне 4 м это излучение оказалось весьма интенсивным.

В 1946 г. было получено распределение интенсивности по спектру солнечного радиоизлучения. Оказалось, что максимум принятого излучения имеет место на волне 4,7 м и что это излучение имеет значительный уровень во всем диапазоне метровых волн. В этом диапазоне радиоизлучение Солнца связано со вспышками солнечной деятельности. Установлена связь между солнечными пятнами и изменением солнечного радиоизлучения. С увеличением площади солнечных пятен увеличивается интенсивность излучения. Интенсивность излучения меняется так же, как и площадь солнечных пятен.

Радиоизлучение Солнца зависит от фазы солнечной деятельности. Наблюдение за солнечной деятельностью дает много данных для прогноза радиосвязей, так как от нее зависят состояние ионосферных слоев и, следовательно, значения рабочих частот.

По радиоизлучению можно более точно судить о солнечной деятельности, чем по площади солнечных пятен. Наблюдение за солнечными пятнами возможно только в ясную погоду, измерению же интенсивности солнечного радиоизлучения облака не мешают. Помехой при измерении радиошумов являются только местные грозы.

Обнаружено, что существует связь между увеличением интенсивности радиоизлучения Солнца и ионосферно-магнитными бурями, приводящими к ухудшению или нарушению связи на КВ. Увеличение интенсивности радиоизлучения наблюдается несколько раньше начала ионосферной бури, что дает возможность предвидеть ее появление и принять соответствующие меры.

При первых наблюдениях за радиоизлучением Галактики и Солнца выяснилось, что принятый антенной сигнал, поданный на громкоговоритель или осциллограф, подобен хаотическому шуму, генерируемому нагретым сопротивлением. Поэтому радиоизлучение часто называют радиошумом.

Радиоастрономы исследуют также радиоизлучение Луны и ближайших к Земле планет: Меркурия, Марса и Венеры. Успешно исследуются и больше удаленные от Земли планеты: Сатурн, Уран, Нептун. Конечно, излучение планет во много раз меньше, чем излучение Солнца. Наиболее полные сведения получены о Луне, поскольку ее видимый размер значительно превышает видимые размеры планет. Оказалось возможным принимать излучение от отдельных участков поверхности Луны и исследовать структуру поверхности. Для других планет возможно измерение только общего радиоизлучения со всей поверхности. Измерения позволили узнать температуру и электрические свойства поверхностей планет.

Радиоастрономические наблюдения ведутся при помощи радиотелескопов, представляющих собой весьма сложные сооружения. Основным элементом радиотелескопа является антенна с управляющим устройством, позволяющим изменять направление излучения в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 67). Такая антенна имеет большие размеры и узкую диаграмму направленности. Радиотелескоп с параболической антенной диаметром 64 м сооружен в пос. Медвежьи озера вблизи Москвы. Эта антенна-телескоп, разработанная под руководством чл.-корр. АН СССР А. Ф. Богомолова, эффективно работает на волнах длиннее 2 см. Для работы на сантиметровых волнах поверхность зеркала должна быть выполнена очень тщательно, с большой точностью, что, конечно, трудно сделать при больших размерах антенны.

Другим методом исследования планет является получение радиолокационных отражений от их поверхностей.

Применение методов радиолокации к изучению строения планет требует мощных передатчиков, больших антенн и встречает ряд других трудностей.

Прежде всего начали проводить радиолокацию поверхности Луны. Расстояние Земля—Луна—Земля составляет 750 000 км, и затухание сигнала на этом пути 200 дБ, т. е. сигнал ослабляется в 10^{10} раз.

Первые отражения радиоволн от Луны были получены учеными Венгрии и США, работавшими независимо, еще в 1946. Использовались передатчики мощностью около 200 кВт, работавшие на волне длиной около 2 м. Применялись остронаправленные антенны с коэффициентом усиления 400.

Прием на Земле сигналов, отраженных от Луны, встречает большие принципиальные трудности. Луна движется относительно Земли с большой скоростью. При больших скоростях существенную роль играет эффект Доплера, заключающийся в том, что волна, отраженная от движущегося тела, имеет частоту колебаний, отличную от частоты посланной волны.

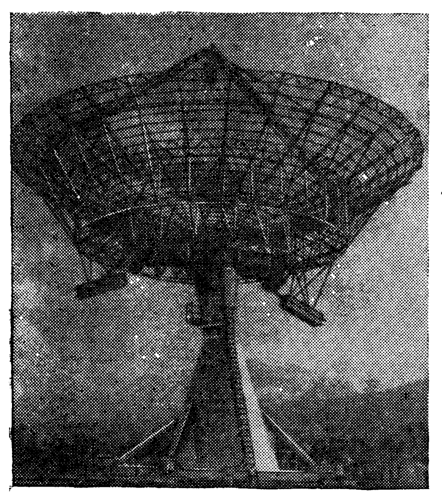


Рис. 67. Антенна радиотелескопа.

Расчет, подтвержденный опытом, показывает, что при работе передатчика на волне частотой 145 МГц разница в частотах переданного и принятого сигналов достигает 200 Гц. Следовательно, для того чтобы сигнал был принят, приемник должен иметь полосу пропускания не менее 200 Гц. Однако в этом случае уровень шумов приемника превышает слабый сигнал, пришедший от Луны. С целью уменьшения влияния шумов полоса пропускания приемника не должна превышать нескольких герц. Это в свою очередь приводит к чрезвычайно высоким требованиям к стабильности частоты передатчика. При рабочей частоте сотни мегагерц он должен иметь стабильность порядка нескольких герц, что весьма трудно обеспечить. Вторая трудность заключается в том, что размеры остронаправленной антенны, предназначенной для работы на метровых волнах, получаются большими, и поэтому ее трудно поворачивать в соответствии с передвижением Луны.

Меньшие размеры антенн требуются при осуществлении радиолокации Луны волнами сантиметрового диапазона. Кроме того, на этих волнах исключается влияние ионосферы. В 1954—1957 гг. в Горьковском университете были поставлены опыты, при которых использовались волны длиной 10 и 3 см. Для осуществления радиолокации применялись передатчики мощностью 1—2 кВт и остронаправленные антенны. Коэффициент направленного действия антенны, предназначенной для работы на волне 3 см, достигал 120 000, и вся излучаемая энергия концентрировалась в угле 0,5°. В результате этих опытов был измерен коэффициент отражения радиоволн от Луны, который составил примерно 0,25, и было установлено, что отражение происходит от центральной части видимого диска Луны.

Радиолокационные исследования Луны продолжались и в 60 годах. Для подготовки к посадке космических аппаратов на лунную поверхность и для проектирования радиотехнических систем, осуществляющих посадку и связь космического аппарата с Землей, необходимо было получить сведения о структуре, характере и электрических свойствах поверхности Луны.

Одновременно начались интенсивные исследования планет Солнечной системы, но для этого пришлось построить радиолокационные установки значительно большей мощности, поскольку наименьшее расстояние от Земли до ближайшей к ней планеты — Меркурия составляет $92 \cdot 10^6$ км.

Планетный радиолокатор Центра дальней космической связи СССР был создан под руководством академика В. А. Котельникова. С помощью этого радиолокатора осуществлена радиолокация Венеры, Марса, Меркурия.

Радиолокационные исследования Луны и планет ведутся в США, Англии и других странах. На разных установках применяются волны различной длины от 2—3 до 70 см. В результате исследований получен обширный материал.

Опыты радиолокации Луны дали реальную почву для осуществления идеи использования Луны в качестве ретранслятора. Действительно, во время своего наибольшего удаления от Земли Луна становится видимой почти со всех пунктов полусферы Земли, обращенной к Луне, и, следовательно, путем отражения от Луны возможна радиосвязь между всеми пунктами, находящимися на этом полушарии. Но такая радиосвязь не может вестись круглосуточно, неизбежны перерывы связи во время захода Луны.

Проводились отдельные опыты установления связей с использованием Луны в качестве ретранслятора. Для этого применялись передатчики мощностью 100 кВт, работающие на частоте около 200 МГц, причем ширина передаваемой полосы частот составляла 3 кГц, т. е. можно было передавать телеграфные и телефонные сообщения. Измерения показали, что радиоволны проходят путь до Луны и обратно за 2,5 с. Односторонняя радиотелеграфная и радиотелефонная связь с использованием Луны в качестве пассивного ретранслятора осуществлялась между Англией и США. Для передачи сигналов использовалась громадная антенна радиотелескопа Манчестерского университета.

В Боннском университете осуществлялся прием отраженных Луной сигналов на волнах 108 и 151 МГц, передаваемых из Бельмара (США). Для радиосвязи использовались передатчик мощностью 50 кВт и передающая антенна в виде параболического зеркала диаметром 15 м. Связь оказывалась возможной в течение 6 ч в сутки. После захода Луны за линию горизонта прием сигнала был возможен еще в течение 10 мин.

Выдвигались проекты использования Луны для ретрансляции передач телевидения. Действительно, телевизионные сигналы, отраженные от Луны, могли бы быть приняты на больших расстояниях, и один передатчик мог бы обслуживать большую территорию. Однако описанные опыты показали, что в настоящее время это неосуществимо.

Исследователи не считают линии связи, использующие отражения радиоволн от Луны, особенно перспективными.

Публикуются сообщения о том, что отражения радиоволн от Луны использовались радиолюбителями для установления дальних связей. Такую работу провел радиолюбитель из штата Нью-Джерси, США, который получал отражения от Луны в течение четырех лет с 1973 по 1976 гг. Он использовал параболическую антенну диаметром 8,5 м, имеющую коэффициент усиления 28 дБ и узкую диаграмму направленности шириной 6° по половинной мощности. Работа велась на волне с частотой колебаний 430 МГц. За эти годы исследователю-радиолюбителю удалось установить двусторонние радиосвязи с радиолюбителями всех континентов. Это еще один пример того, как радиолюбители осваивают новые пути распространения радиоволн.

С запуском 4 октября 1957 г. первого искусственного спутника Земли открылась новая страница в исследовании планет Солнечной системы. Стало возможным исследовать поверхности и атмосферы планет с близких расстояний. Автоматическая станция «Луна-2» впервые доставила научную аппаратуру к космическому телу и как бы проложила дорогу многочисленным последующим станциям.

Космические аппараты направлялись к Луне, Марсу, Венере, Меркурию, Юпитеру и с близкого расстояния сообщали сведения о Луне и планетах. На поверхностях Луны, Венеры и Марса работали приборы, доставленные сюда космическими аппаратами. Запускались искусственные спутники Луны, Венеры, Марса, которые позволили обследовать эти небесные тела со всех сторон и получить изображение невидимой для нас обратной стороны Луны.

На космических кораблях и станциях устанавливается различная аппаратура. Ведется радиоастрономическое наблюдение за излучением планет и устанавливается радиолокационная аппаратура, позволяющая со сравнительно небольших расстояний проводить более детальные исследования поверхностей и атмосфер планет.

Оказалось, что наиболее полные данные можно получить в том случае, когда исследования при помощи аппаратуры, установленной на космических кораблях, сочетаются с наземными радиоастрономическими и радиолокационными наблюдениями.

Подробные данные о строении атмосфер планет дает их радиопросвечивание. Для проведения радиопросвечивания передатчик, установленный на борту

космического аппарата, посылает сигналы, принимаемые на Земле. По мере захода аппарата за планету радиоволны все больший путь проходят в атмосфере планеты, и траектория волны проходит все ближе к поверхности планеты.

Атмосфера планет неоднородна, и в ней происходит рефракция радиоволн аналогично тому, как это имеет место в атмосфере Земли. По мере движения аппарата меняется траектория и скорость распространения волны в атмосфере планеты. Наблюдая за направлением прихода сигнала и изменением его фазы, получают данные об изменении коэффициента преломления атмосферы планеты с высотой. Все эти измерения проводятся на волнах УКВ диапазона.

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ И АТМОСФЕР ПЛАНЕТ ВНУТРЕННЕЙ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Планеты Меркурий, Венера и Марс вместе с Землей занимают внутреннюю часть Солнечной системы и наиболее доступны для исследований. Именно эти планеты вместе с Луной в первую очередь исследуются радиоастрономическими, радиолокационными методами и при помощи космических станций. Ближайшей к Солнцу планетой является Меркурий; самой удаленной от Солнца планетой внутренней части Солнечной системы является Марс.

В табл. 2 указаны размеры планет (максимальный радиус планеты), расстояние каждой планеты от Солнца, а также максимальное и минимальное расстояния от планеты до Земли.

Таблица 2

Планета	Радиус экватора		Среднее расстояние от планет до Солнца, 10^6 км	Расстояние от Земли до планет, км
	км	относительно радиуса Земли		
Земля	6370	1	149,6	—
Луна	1740	0,27	149,6	384400
Меркурий	2500	0,38	57,9	$(92—207)\cdot 10^6$
Венера	6060	0,95	108,2	$(39—258)\cdot 10^6$
Марс	3300	0,52	228,0	$(56—398)\cdot 10^6$

Ближайшая планета внешней части Солнечной системы — Юпитер удалена от Солнца на расстояние, в пять раз большее чем расстояние от Солнца до Земли. Расстояние от Земли до планет внешней части Солнечной системы в несколько раз превышает расстояние до планет внутренней части Солнечной системы, что существенно усложняет условия исследования планет внешней части Солнечной системы.

Рассмотрим кратко основные радиофизические параметры поверхностей и атмосфер Луны и планет внутренней части Солнечной системы, численные данные этих параметров сведены в табл. 3.

Лунная поверхность представляет собой темный сухой материал, несколько отличающийся по химическому составу от земных пород. Более твердую поверхность Луны покрывает осколочно-пылевой слой, названный реголитом. Плотность реголита наименьшая на поверхности и возрастает с глубиной, а общая толщина слоя колеблется от 40 см до 40 м. Советский исследователь В. С. Троицкий первый на основании радиолокационных наблюдений Луны предсказал, что поверхность Луны достаточно плотная, а не представляет собой толстый слой пыли, как думали ранее. Предсказания В. С. Троицкого полностью оправдались: когда первый лунный астронавт Н. Армстронг с опаской сделал первый шаг по Луне, оказалось, что грунт Луны достаточно прочен, и обувь астронавта погрузилась в пыль не более чем на 2 см. Характерной особенностью лунной поверхности является наличие кратеров — кольцевых горных образований. Большие равнины на поверхности Луны исследователи назвали «морями».

Таблица 3

Планета	Характер поверхности	Максимальная температура поверхности, T, °C	Коэффициент отражения поверхности	Атмосферное давление вблизи поверхности, Па	Коэффициент преломления тропосферы n	Электронная плотность ионосферы, э/см^3
Земля	Вода, суша	58	0,40	10^5	1,00031	10^6
Луна	Реголит, скалы, пыль	130	0,06	1,0	1,00000	10^3
Меркурий	Скалы, пыль	420	0,06	10^2	1,00000	$1,5\cdot10^3$
Венера	Скалы	480	0,12	$9,2\cdot10^6$	1,01400	$5\cdot10^5$
Марс	Равнина	30	0,07	$6\cdot10^2$	1,00008	10^5

Первые сведения о строении поверхности обратной. невидимой с Земли, стороны Луны были получены с помощью межпланетной станции, запущенной 4 октября 1959 г. Неоднократные радиолокационные исследования Луны, проводившиеся на УКВ различной длины, позволили оценить электрические параметры ее поверхности. По своим электрическим свойствам поверхность Луны близка к пустыням на Земле. Вода на поверхности Луны отсутствует. Давление атмосферы вблизи поверхности Луны не превышает 1 Па. Луна не обладает существенным магнитным полем.

Оказалось, что плотность электронов вблизи поверхности Луны больше, чем в космосе, и достигает 10^3 э/см^3. Поэтому говорят, что Луна имеет ионосферу.

Меркурий наиболее близко расположен к Солнцу. Радиолокационные отражения, полученные от поверхности Меркурия, указывают на то, что характер и электрические параметры его поверхности близки к поверхности Луны. Меркурий имеет очень разреженную атмосферу (атмосферное давление у поверхности около 100 Па), состоящую из тяжелых инертных газов: криптона, аргона и ксенона. Максимальная плотность электронов составляет $1,5\cdot10/^3$ э/см^3.

Венера по размеру, расстоянию от Солнца и протяженности атмосферы больше других планет похожа на Землю. Исследования планеты Венеры радиолокационным методом на волнах длиной от 3 см до 8 м показали, что ее поверхность имеет гористые участки и так же шероховата, как поверхность Луны. Проводимость поверхности ничтожна мала, а средняя диэлектрическая проницаемость такая же, как у скальных пород Земли.

Основной компонентой атмосферы Венеры является углекислый газ. Плотность атмосферы велика, и давление вблизи поверхности достигает $9,2\cdot10^6$ Па. Газы атмосферы Венеры ионизированы, причем днем электронная плотность ее достигает $5\cdot10^5$ э/см^3, а ночью уменьшается до 10^4 э/см^3 и имеет максимум на высоте 150 км. Получен график изменения электронной плотности с высотой. В атмосфере содержится значительное количество пыли, образующей облака, завихряющиеся и перемещающиеся благодаря господствующим там ветрам. Венера обладает постоянным магнитным полем.

Марс имеет поверхность, представляющую собой, в основном, пустынные равнины, состоящие из вулканических пород. Вблизи полюсов имеются шапки снега и льда. Воды на Марсе мало. Средняя диэлектрическая проницаемость такая же, как у пустынных пород Земли.

Атмосфера Марса состоит в основном из углекислого газа. В атмосфере содержатся пыль и кристаллы льда в виде облаков. Давление атмосферы у поверхности Марса составляет примерно $6\cdot10^2$ Па и убывает с высотой по экспоненциальному закону, так что на высоте 30 км давление менее 10 Па. Поэтому на высотах более 30 км тропосфера Марса не влияет на распространение УКВ. На дневной стороне Марса обнаружена ионосфера с максимальной электронной плотностью 10^5 э/см^3, находящейся на высоте 120 км. На ночной стороне электронная плотность снижается до 10^3 э/см^3.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН ВБЛИЗИ ПЛАНЕТ

В настоящее время имеются расчетные и экспериментальные данные о распространении радиоволн вблизи поверхностей Луны, Венеры, Марса и в атмосферах планет. Расчеты проводятся теми же методами, что и для наземных радиотрасс: учитывается влияние поверхности, тропосферы и ионосферы планеты.

На Луне возможно распространение только поверхностных волн, поскольку атмосфера практически отсутствует.

Использование УКВ диапазона в условиях Луны не может дать хороших результатов, так как радиус Луны составляет 1738 км и дальность прямой видимости на Луне в 1,9 раза меньше, чем на Земле [см. формулу (13)], и даже при высоте подъема антенн $h_1 = h_2 = 10$ м она не превышает 12 км. Плохая проводимость поверхности Луны приводит к большим потерям поверхностной волны, а малый радиус кривизны Луны ухудшает условия дифракции по сравнению с земными условиями.

Основным фактором, определяющим условие работы радиолинии Земля — Марс и Земля — Венера, являются большие расстояния. Даже тогда, когда эти планеты находятся на минимальном расстоянии от Земли, необходим запас мощности радиосистемы в 225—270 дБ.

Марс имеет сильно разреженную атмосферу, которая оказывает слабое влияние на распространение радиоволн при расположении источника на планете. Радиопросвечивание атмосферы Марса, когда межпланетная станция проходит вблизи планеты, позволило получить информацию о параметрах ее атмосферы.

Венера окружена плотной атмосферой, которая существенно влияет на распространение радиоволн, вызывая рефракционные эффекты и поглощение.

Радиоволны, излученные источником, находящимся на поверхности Венеры, сильно рефрагируют в тропосфере Венеры, а при угле места луча менее 8° происходит сверхрефракция, и волны не выходят за пределы атмосферы планеты. Неоднородности коэффициента преломления атмосферы Венеры более интенсивные, чем атмосферы Земли, что приводит к сильным замираниям сигнала. Молекулярное поглощение вызывает ослабление радиоволн сантиметрового диапазона при прохождении всей толщи атмосферы примерно на 5—10 дБ; волны длиной 30—60 см практически не испытывают поглощения. Ионосфера Венеры отражает более короткие волны, чем ионосфера Земли.

Исследование распространения радиоволн в космическом пространстве и вблизи планет только началось. Но вклад советских ученых в этой области очень велик. Эти исследования требуют сложной аппаратуры, и в них участвуют большие научные коллективы. В области распространения радиоволн много интересных результатов получено М. А. Колосовым, О. И. Яковлевым и многими другими. Подробнее об этих исследованиях можно прочитать в книгах, указанных в списке литературы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы кратко ознакомились с основными особенностями распространения КВ и УКВ. При этом неоднократно указывалось, что далеко не все явления в этой области полностью изучены. Ведь распространение радиоволн — процесс весьма сложный, подверженный влиянию разнообразных природных явлений.

На условия распространения радиоволн оказывают влияние как процессы, происходящие далеко за пределами земной атмосферы (появление солнечных пятен, вспышки на Солнце, космические лучи, метеоры), так и процессы, происходящие вблизи земной поверхности (в ионосфере и тропосфере) и на самой земной поверхности (строительство новых зданий, движение транспорта и т. п.).

Условия распространения радиоволн изменяются в зависимости от времени суток, времени года, фазы солнечной деятельности, от погоды. Для изучения особенностей распространения радиоволн в различных условиях требуется большое количество наблюдений. Необходимо наблюдать условия распространения радиоволн в разное время, на различных расстояниях, над разной местностью. Обобщив такие наблюдения, можно выявить определенные закономер-

ности и, обосновав их теоретически, получить расчетные формулы. Это позволит в дальнейшем правильнее вести расчет линий радиосвязи, радиовещания и телевизионного вещания, даст возможность предсказать вероятные нарушения связи и предусмотреть способы борьбы с ними.

Радиолюбители сыграли большую роль в развитии радиосвязи. Ведь именно они первыми стали осваивать диапазон КВ и указали путь правильного использования этого диапазона, использовали новые возможности сверхдальнего распространения УКВ,

При современном широком развитии радиолюбительства возможно проведение массовых наблюдений за распространением радиоволн. Радиолюбители ведут прием сигналов искусственных спутников и космических кораблей, увлекаются дальним приемом телевидения, наблюдают за распространением МВ, осуществляют дальние связи в дециметровом диапазоне.

Нет сомнения, что, опираясь на армию советских радиолюбителей, наши научные институты смогут проводить массовые эксперименты по изучению распространения радиоволн.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. ПЕРЕВОД ДЕЦИБЕЛ В ОТНОШЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ И НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ПОЛЯ

Усиление			Ослабление		
дБ	P/P_0	E/E_0	дБ	P/P_0	E/E_0
0,1	1,023	1,012	—0,1	0,977	0,990
0,5	1,122	1,059	—0,5	0,891	0,943
1	1,259	1,122	—1	0,794	0,893
2	1,585	1,259	—2	0,631	0,794
3	1,995	1,413	—3	0,501	0,709
4	2,512	1,585	—4	0,398	0,633
5	3,162	1,778	—5	0,316	0,562
6	3,981	1,995	—6	0,251	0,501
7	5,012	2,239	—7	0,200	0,446
8	6,310	2,512	—8	0,159	0,398
9	7,943	2,818	—9	0,126	$3{,}55\cdot10^{-1}$
10	10	3,162	—10	10^{-1}	$3{,}16\cdot10^{-1}$
20	10^2	10	—20	10^{-2}	10^{-1}
30	10^3	31,6	—30	10^{-3}	$3{,}16\cdot10^{-2}$
40	10^4	10^2	—40	10^{-4}	10^{-2}
50	10^5	$3{,}16\cdot10^2$	—50	10^{-5}	$3{,}16\cdot10^{-3}$
60	10^6	10^3	—60	10^{-6}	10^{-3}
70	10^7	$3{,}16\cdot10^3$	—70	10^{-7}	$3{,}16\cdot10^{-4}$
80	10^8	10^4	—80	10^{-8}	10^{-4}
90	10^9	$3{,}16\cdot10^4$	—90	10^{-9}	$3{,}16\cdot10^{-5}$
100	10^{10}	10^5	—100	10^{-10}	10^{-5}
200	10^{20}	10^{10}	—200	10^{-20}	10^{-10}
300	10^{30}	10^{15}	—300	10^{-30}	10^{-15}

2. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ

Диапазон радиоволн	Предельное расстояние распространения поверхностной волны, км	Предельное расстояние распространения пространственной волны, км	Особенности распространения	Антенны	Применение
Мириаметровые (сверхдлинные) волны (длиннее 10 000 м, ниже 30 кГц)	3000	3000—10 000	Обеспечивается устойчивая связь, уровень сигнала мало меняется в течение суток и года	Антенны очень больших размеров, ненаправленные с низким к.п.д. (10—30%)	Дальняя навигация, телеграфная связь, связь с подводными лодками
Километровые (длинные) волны (1000—10 000 м, 300—30 кГц)	1000	1000—10 000	То же	То же	То же
Гектометровые (средние) волны (100—1000 м, 3000—300 кГц)	400	400—3000	Распространение на большие расстояния возможно только ночью, сигнал подвержен замираниям	Антенны-башни, направленность только в вертикальной плоскости, к.п.д. = 50—80%	Радиовещание, связь и радионавигация только поверхностной волной
Декаметровые (короткие) волны (10—100 м, 30—3 МГц)	100	1000—20 000 (огибают Землю)	Необходима смена волн (днем 10—25 м, ночью 35—100 м), ночью сигнал сильнее, связь подвержена нарушениям, сильные замирания сигнала	Направленные антенны, коэффициент направленности 10—100, к.п.д. = =60—90%	Связь и радиовещание на большие расстояния
Метровые волны (УКВ) (1—10 см, 300—30 МГц)	70 (в пределах прямой видимости)	1000—2000	Нерегулярное распространение отражением от слоя E_c днем в летнее время, рассеяние на неоднородностях ионосферы	Остронаправленные антенны, поднятые высоко над землей, коэффициент направленности 10—1000, к.п.д. = 95%	Связь на малые и большие (в Арктике) расстояния; телевидение, радиолокация, радионавигация, связь со спутниками и космическими ракетами
Дециметровые (10—100 см, 3000—300 МГц) и сантиметровые волны (УКВ) (1—10 см, 30 000—3000 МГц)	70 (в пределах прямой видимости)	30—600	Влияние метеорологических условий, рассеяние и поглощение в тропосфере (ионосфера не влияет)	То же, но коэффициент направленности 1000—10 000	Связь, телевидение, радиолокация, связь со спутниками и космическими ракетами

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник** по теоретическим основам радиоэлектроники/Под ред. А. А. Куликовского. Т. 1. — М.: Энергия, 1977.

2. **Грудинская Г. П.** Распространение радиоволн — М.: Высшая школа, 1975

3. **Штерн М. И.** Космос — Земле. — М.: Наука, 1976

4. **Крупенко Н. Н.** Радиофизические исследования планет. — М.: Наука, 1978.

5. **Чижевский А. Н.** Земное эхо солнечных бурь. — М.: Наука, 1973.

6. **Родионов В. М.** Линии передачи и антенны УКВ. — М.: Энергия, 1977.

7. **Дриацкий Г. И.** и др. Инструкция по расчету КВ-линий радиосвязи в высоких широтах. — М.: Наука, 1969

СОДЕРЖАНИЕ

55 к.

"РАДИО И СВЯЗЬ"